

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

#### **1.1. Hasil Pemeriksaan Parameter Organik dan Nutrien**

Hasil analisis laboratorium terhadap air limbah domestik pada tiga unit IPAL ABR di Kecamatan Alam Barajo, Kota Jambi menunjukkan variasi konsentrasi berbagai parameter baik sebelum maupun sesudah pengolahan. Data lengkap konsentrasi pH, suhu, DO, BOD, COD, TSS, Minyak dan Lemak, amonia, dan fosfor pada influen dan efluen dari masing-masing unit pengolahan disajikan pada **Tabel 4.1**. Sebagian besar hasil pemeriksaan laboratorium menunjukkan bahwa nilai parameter tersebut belum memenuhi baku mutu air limbah domestik berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 11 Tahun 2025.

Berdasarkan **Tabel 4.1**, seluruh unit IPAL ABR telah mampu memenuhi standar baku mutu untuk parameter pH dan suhu, dengan nilai pH pada efluen berkisar antara 6,1–6,3 dan suhu antara 28,7–32°C. Stabilitas kedua parameter fisika-kimia ini penting untuk menjamin berlangsungnya proses biologis selama pengolahan. Konsentrasi DO pada efluen mengalami peningkatan dibandingkan influen, meski masih berada pada kisaran rendah (0,2–0,54 mg/L), yang menunjukkan bahwa proses oksidasi dalam unit ABR belum berlangsung maksimal serta belum mampu meningkatkan kandungan oksigen terlarut yang diperlukan untuk proses biologis lebih lanjut. Parameter organik seperti BOD dan COD memiliki konsentrasi awal yang tinggi pada influen dan mengalami penurunan cukup signifikan setelah pengolahan. BOD influen tercatat pada kisaran 514,3–544,3 mg/L, sedangkan COD mencapai 1200,3–3199 mg/L. Penurunan pada kedua parameter ini menunjukkan efisiensi proses pengolahan dalam menghilangkan beban organik limbah domestik, meski pada beberapa unit hasil akhir masih belum sepenuhnya memenuhi baku mutu. Demikian juga pada TSS yang berkisar 63,3–87 mg/L pada influen dan turun pada efluen, menunjukkan efektivitas sedimentasi dan filtrasi yang berlangsung di reaktor ABR.

**Tabel 4.1.** Hasil Analisis Parameter Organik dan Nutrien Air Limbah Tiga IPAL di Kota Jambi

No	Parameter	Satuan	Jumlah SR	Baku Mutu (*)	IPAL 1			IPAL 2			IPAL 3		
					Influen	Efluen	Efisiensi (%)	Influen	Efluen	Efisiensi (%)	Influen	Efluen	Efisiensi (%)
1	pH	-	53	6-9	6,3 ± 0,1	6,2 ± 0,35	-	6,4 ± 0,36	6,3 ± 0,12	-	6,2 ± 0,058	6,1 ± 0,25	-
2	Suhu	°C	53	-	29 ± 0,58	28,7 ± 0,58	-	30,3 ± 1,53	30,3 ± 1,53	-	32 ± 0	32 ± 0	-
3	DO	mg/L	53	≥1	0,23 ± 0,06	0,5 ± 0,1	-	0,2 ± 0	0,2 ± 0,06	-	0,2 ± 0,058	0,54 ± 0,06	-
4	BOD	mg/L	53	30	1206,3 ± 135	514,3 ± 301,64	57,36	1307,7 ± 125,08	532 ± 276,35	60,01	1617,3 ± 161,65	544,3 ± 310,99	66,34
5	COD	mg/L	53	100	3199,3 ± 1447,07	630,3 ± 662,07	80,30	3302,3 ± 2432,84	1267 ± 683,86	61,84	3331,7 ± 1039,02	1200,3 ± 618,3	63,97
6	TSS	mg/L	53	30	164 ± 104,23	87 ± 79,30	46,95	198 ± 81,28	83 ± 89,29	73,23	149,7 ± 87,24	63,3 ± 56,77	67,48
7	Minyak dan Lemak	mg/L	53	5	50 ± 17,39	33,3 ± 6,35	32,89	56,3 ± 12,58	34 ± 7,21	39,64	61,3 ± 3,51	31 ± 7	49,46
8	Amonia	mg/L	53	10	0,31 ± 0,11	0,2 ± 0,02	31,69	0,3 ± 0,1	0,2 ± 0,04	35,68	0,34 ± 0,14	0,22 ± 0,1	34,18
9	Fosfor	mg/L	53	2	3,4 ± 0,34	2,6 ± 0,42	23,86	3,4 ± 0,48	2,6 ± 0,51	23,41	3,60 ± 0,44	2,64 ± 0,1	26,60
10	Mikroplastik	Partikel/L	53	10,4	457,33	57,67	85,75	325	32	85,85	510,67	72	85,75

Keterangan:

Baku mutu pada Peraturan Menteri Lingkungan hidup No. 11 Tahun 2025 tentang baku mutu air limbah dan standar teknologi pengolahan air limbah untuk air limbah domestik.

IPAL 1 = IPAL RT 10. Kel. Rawasari Kec. Alam Barajo

IPAL 2 = IPAL RT. 35 Kel. Bagan Pete Kec. Alam Barajo

IPAL 3 = IPAL RT. 17 Kel. Pinang Merah Kec. Alam Barajo

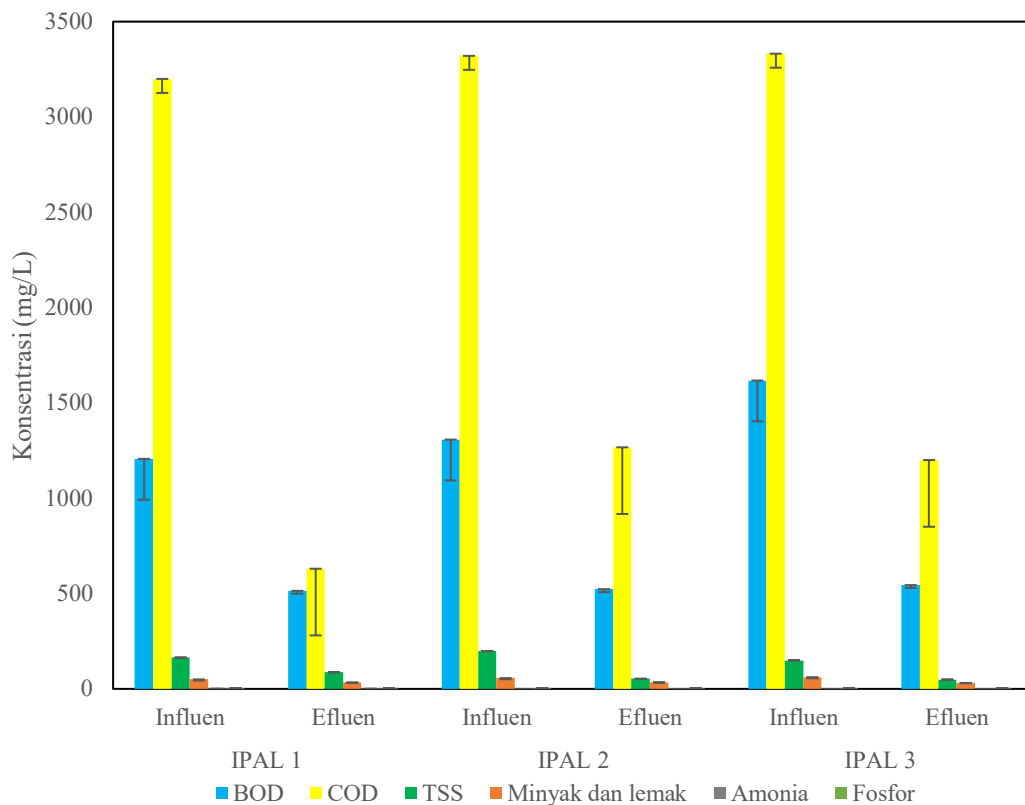
**Tabel 4.2.** Perbandingan Pemeriksaan Organik dan Nutrien IPAL ABR di Kota Jambi dengan Penelitian Terdahulu

No	Parameter	Satuan	Hidayaturrehman dan Lee (2019)		Rachmawati (2022)		Penelitian saat ini (2025)	
			Influen	Efluen	Influen	Efluen	Influen	Efluen
1	pH	-	6,5	7,2	6,31	6,2	6,8	7,1
2	Suhu	°C	-	-	30,33	28,7	-	-
3	DO	mg/L	0,2	0,6	0,22	0,5	0,3	0,7
4	BOD	mg/L	300	100	1377,11	514,3	250	90
5	COD	mg/L	680	200	3283,78	630,3	550	190
6	TSS	mg/L	200	50	170,56	87,0	180	40
7	Minyak dan Lemak	mg/L	-	-	55,78	33,3	-	-
8	Amonia	mg/L	2,1	1,0	0,32	0,2	1,6	0,7
9	Fosfor	mg/L	1,3	0,8	0,05	0,1	3,44	2,6

Untuk parameter minyak dan lemak, meskipun terjadi penurunan, konsentrasi hasil pengolahan masih di atas ambang batas yang diizinkan (31–34 mg/L), menandakan perlunya penanganan lanjutan atau metode tambahan untuk senyawa ini.

Sedangkan nutrisi seperti amonia pada efluen (amonia 0,2–0,22 mg/L), fosfor tercatat sebesar 2,6 mg/L), namun pada beberapa unit ditemukan adanya peningkatan konsentrasi fosfor akibat proses dekomposisi organik yang melepaskan kembali senyawa fosfat ke dalam air limbah.

Penjabaran data pada **Tabel 4.1** didukung oleh visualisasi pada **Gambar 4.1** yang menampilkan grafik batang perbandingan konsentrasi seluruh parameter pada influen dan efluen setiap IPAL ABR. Grafik ini membantu memperjelas tren penurunan maupun kenaikan konsentrasi dari setiap parameter yang diuji memudahkan dalam pengamatan performa awal dan akhir setiap unit pengolahan limbah.



**Gambar 4.1.** Konsentrasi Parameter Organik dan Nutrien

Dalam rangka menilai kinerja IPAL ABR, dilakukan perbandingan dengan hasil penelitian terdahulu. Penelitian ini memperlihatkan adanya variasi konsentrasi

influen dan efluen yang dipengaruhi oleh karakteristik limbah, waktu tinggal hidrolis, serta pemeliharaan sistem IPAL. Perbandingan bertujuan untuk mengukur efektivitas IPAL komunal yang dikaji, baik secara organik (BOD, COD, TSS) maupun unsur nutrien (amonia dan fosfor), sebagaimana disajikan pada **Tabel 4.2**. Berdasarkan **Tabel 4.2**, pemeriksaan parameter organik dan nutrien air limbah pada IPAL ABR di Kota Jambi dengan penelitian terdahulu. Secara umum, terlihat penurunan signifikan pada sebagian besar parameter setelah proses pengolahan (dari influen ke efluen) di tiap penelitian. Nilai pH sebelum dan sesudah pengolahan berkisar antara 6,2 hingga 7,2, menunjukkan keseimbangan yang tetap mendekati netral pada semua sistem. Suhu dan DO pada penelitian Rachmawati (2022) dan saat ini menunjukkan kondisi lingkungan reaktor yang mendukung proses anaerob dan aerob, dengan DO meningkat dari 0,22–0,3 mg/L pada influen menjadi 0,5–0,7 mg/L pada efluen. BOD dan COD sebagai indikator polusi organik konsisten turun secara signifikan dari influen ke efluen misalnya, BOD dari 1377,11 mg/L (Rachmawati, 2022) menjadi 514,3 mg/L pada efluen, dan penelitian saat ini dari 250 mg/L menjadi 90 mg/L. Pola serupa juga teramati pada COD dan TSS. Persentase penurunan TSS cukup baik; dari 180 mg/L pada influen menjadi 40 mg/L pada efluen (penelitian saat ini). Penurunan konsentrasi amonia dan fosfor juga menunjukkan efisiensi proses pengolahan IPAL ABR, meski angka pasca-olah tidak selalu di bawah baku mutu. Amonia turun dari 1,6–2,1 mg/L pada influen menjadi 0,7–1,0 mg/L pada efluen, sedangkan fosfor dari 3,4–3,6 mg/L pada influen menjadi 2,6 mg/L pada efluen.

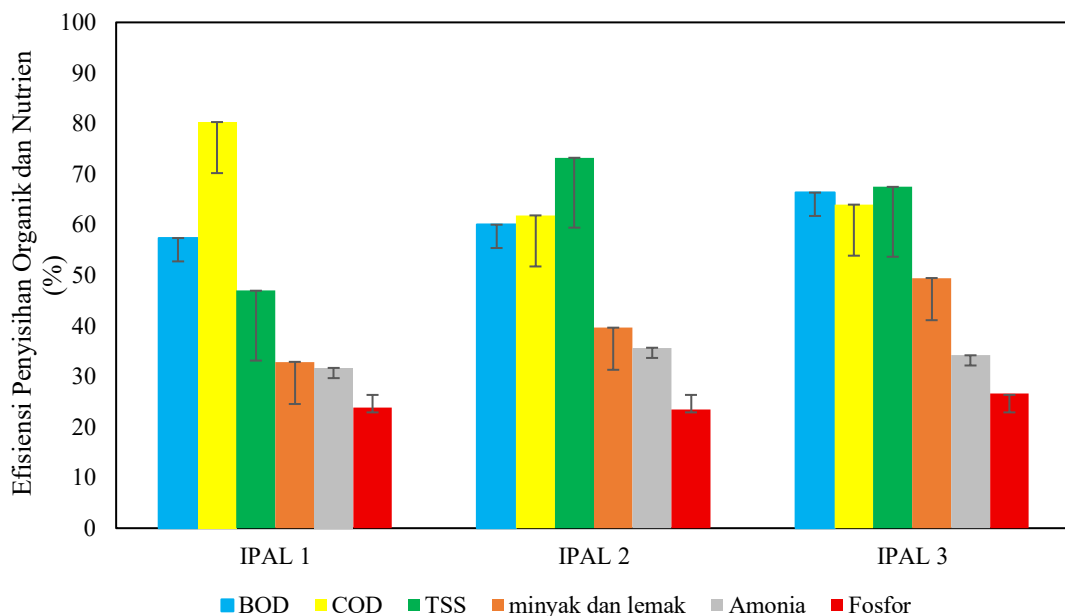
Dengan membandingkan penelitian terdahulu dan penelitian saat ini, dapat disimpulkan bahwa kinerja IPAL ABR dalam menurunkan parameter pencemar organik (BOD, COD, TSS) maupun nutrien (amonia, fosfor) secara konsisten efektif, meski hasil akhir belum selalu memenuhi baku mutu nasional. Oleh sebab itu, penambahan unit *post-treatment* sangat disarankan untuk meningkatkan mutu efluen agar lebih aman bagi lingkungan dan kesehatan masyarakat.

## **1.2. Efisiensi Penyisihan Parameter Organik dan Nutrien**

Pada penelitian ini, menyoroti kemampuan masing-masing unit IPAL ABR dalam menurunkan konsentrasi parameter organik dan nutrien, sebagai indikator

keberhasilan proses pengolahan limbah domestik. Berdasarkan **Tabel 4.1** menunjukkan konsentrasi influen dan efluen serta efisiensi penyisihan enam parameter utama air limbah pada tiga unit IPAL ABR (IPAL 1, IPAL 2, dan IPAL 3) di Kota Jambi. Data hasil uji tiga unit IPAL ABR di Kota Jambi menunjukkan bahwa sistem ABR cukup efektif dalam menurunkan kandungan BOD, COD, dan TSS, parameter organik utama dalam air limbah dengan efisiensi berkisar antara 57% hingga 80%. Namun, efisiensi penyisihan untuk minyak dan lemak, serta nutrien amonia dan fosfor, umumnya lebih rendah, hanya berkisar 32% hingga 49%, bahkan untuk fosfor ada peningkatan konsentrasi pada efluen di salah satu unit. Efektifitas antar unit juga bervariasi, yang dipengaruhi oleh faktor desain maupun operasi masing-masing IPAL. Hasil ini menegaskan bahwa meski IPAL ABR handal untuk pencemar organik dan padatan, tetap diperlukan unit pengolahan tambahan agar efluen memenuhi baku mutu lingkungan terutama untuk parameter minyak/lemak dan nutrien.

Gambaran visual efisiensi penyisihan tiap parameter pada tiga IPAL ABR dapat dilihat pada **Gambar 4.2**, yang menyajikan grafik persentase efisiensi dari masing-masing parameter. Grafik ini memberikan informasi komparatif yang jelas terkait kinerja masing-masing unit dalam upaya pemenuhan baku mutu air limbah domestik di Kota Jambi.



**Gambar 4.2.** Efisiensi Penyisihan Parameter Organik dan Nutrien

### 1.3. Hasil Pengukuran Mikroplastik

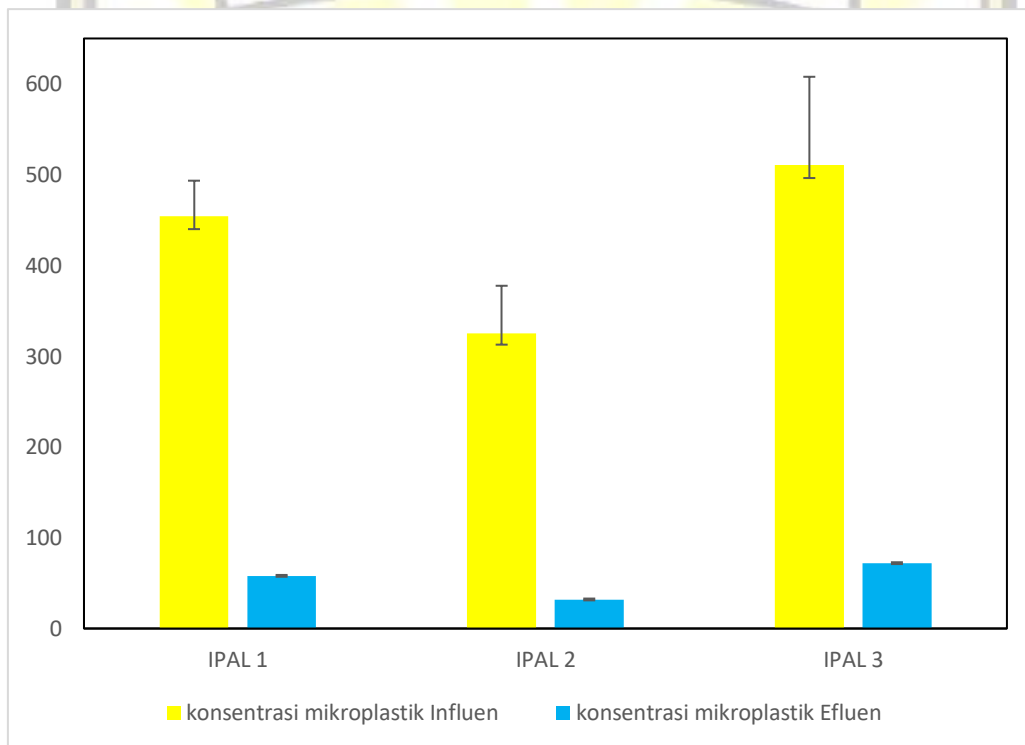
Analisis mikroplastik pada air limbah domestik dari tiga unit IPAL ABR di Kecamatan Alam Barajo, Kota Jambi, dilakukan untuk mengetahui efektivitas sistem pengolahan dalam menyisihkan partikel mikroplastik. Pengukuran dilakukan pada sampel influen dan efluen tiap unit untuk menilai penurunan jumlah partikel akibat proses pengolahan. Hasil pengukuran rata-rata dan sebaran konsentrasi mikroplastik pada masing-masing unit IPAL ABR disajikan pada **Tabel 4.3.**

**Tabel 4.3.** Konsentrasi Mikroplastik Pada Influen, Lumpur, dan Efluen

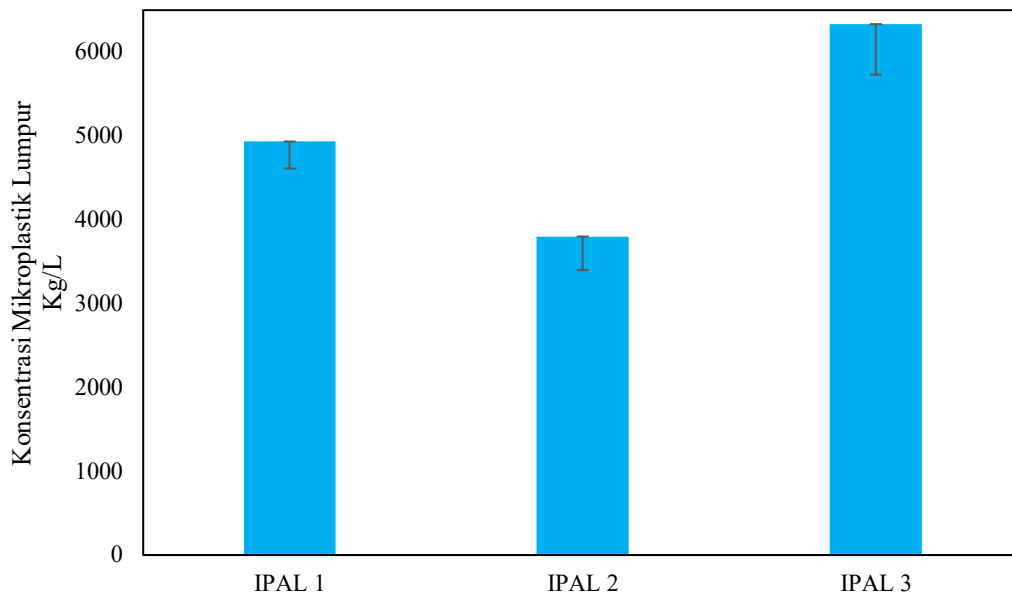
Lokasi Sampling	Satuan	IPAL 1	IPAL 2	IPAL 3	Rata-rata	SD	Rata-rata + SD
Influen	Partikel/L	457,33	325	510,67	431	95,59	431 ±95,59
Lumpur	Partikel/Kg	4933,33	3800	6333,33	5022,22	1269	5022,22 ±1269
Efluen	Partikel/L	57,67	32	72	53,89	20,27	53,89 ±20,27

Berdasarkan **Tabel 4.3** menyajikan data hasil pengukuran konsentrasi mikroplastik pada tiga media utama dari sistem pengolahan IPAL ABR, yaitu influen (air limbah mentah yang masuk), lumpur hasil proses, dan efluen (air hasil olahan yang keluar). Data yang ditampilkan berasal dari tiga unit IPAL (IPAL 1, IPAL 2, IPAL 3) dan dilengkapi dengan nilai rata-rata serta standar deviasi (SD) sebagai representasi variasi data antar unit. Pada influen, jumlah mikroplastik yang terdeteksi memiliki rentang dari 325-510,67 partikel/L dengan rata-rata  $431 \pm 95,59$  partikel/L. Nilai ini menunjukkan tingkat pencemaran awal mikroplastik pada limbah domestik yang masuk ke sistem IPAL di wilayah penelitian. Pada lumpur, konsentrasi mikroplastik jauh lebih tinggi, berkisar antara 3.800-6.333,33 partikel/Kg dengan rata-rata  $5.022,22 \pm 1269$  partikel/Kg. Hal ini menegaskan peran penting lumpur (fase padat hasil pengolahan) dalam menahan dan mengakumulasi sebagian besar mikroplastik dari aliran limbah cair. Proses sedimentasi dalam reaktor ABR sangat efektif menangkap partikel mikroplastik sehingga terjadi akumulasi pada lumpur, bukan pada efluen. Pada efluen, ditemukan penurunan yang signifikan jumlah mikroplastik, dengan rentang 32-72 partikel/L, rata-rata  $53,89 \pm 20,27$  partikel/L. Penurunan konsentrasi mikroplastik pada efluen setelah pengolahan membuktikan bahwa sistem IPAL ABR berfungsi secara efektif dalam mengurangi beban polutan

mikroplastik sebelum air limbah dibuang ke lingkungan. Secara umum, **Tabel 4.3** memperlihatkan gambaran menyeluruh tentang distribusi mikroplastik pada tiap fase pengolahan limbah domestik, sekaligus mendukung analisis efisiensi penyisihan dan mengenali potensi risiko pelepasan mikroplastik yang masih terdapat pada efluen maupun lumpur IPAL. Konsentrasi mikroplastik pada influen dan efluen disajikan pada **Gambar 4.3** dan konsentrasi mikroplastik pada lumpur disajikan pada **Gambar 4.4**. Perbandingan konsentrasi mikroplastik penelitian terdahulu dengan hasil penelitian saat ini disajikan pada **Tabel 4.4**.



**Gambar 4.3.** Perbandingan Konsentrasi Mikroplastik pada Influen dan Efluen di Ketiga IPAL ABR Kota Jambi



**Gambar 4.4.** Konsentrasi Mikroplastik pada Lumpur di Ketiga IPAL ABR Kota Jambi

**Tabel 4.4.** Perbandingan Konsentrasi Mikroplastik dengan Penelitian Terdahulu

Peneliti	Tipe Pengolahan dan Sambungan Rumah/ Jumlah Penduduk	Konsentrasi Mikroplastik			Efisiensi Penyisihan	
		Influen (partikel/L)	Lumpur (partikel/Kg)	Efluen (partikel/L)		
Polyethylene Terephthalate (PET) sebagai media lekat pada reaktor <i>fixed bed</i> dalam pengolahan air limbah domestik dan keberadaannya di dalam reaktor sebagai mikroplastik (Nur dkk., 2022)	Anaerobic Upflow Filter (AUF) dan 320 SR, 70 SR, 100 SR dan 63 SR	636,3 ± 13,87	6.256,25 ± 823,94	88,7 ± 4,2	78,90–90,34	
		– 818,33 ± 18,77		– 157,67 ± 4,04		
Mikroplastik di 48 IPAL menganalisis perbedaan regional dalam karakteristik fisik dan penyisihan yang bergantung pada zona transisi antara china utara dan selatan (Hu dkk., 2022)	Anaerobik, Anoksik dan Aerobik (AAO)	70,9	-	6,5	89,7	
	Sistem Lumpur Aktif Siklik (CASS)	76,2		9,8	85,4	
	Bioreaktor Membran (MBR)	85,5		13,8	83,9	
Keberadaan, karakteristik dan penyisihan mikroplastik di instalasi pengolahan air limbah yang berlokasi di atlantik Maroko (Hajji dkk., 2023)	Activated sludge dan 61.000 jiwa	188 ± 29,04	-	50 ± 6,20	72	
	Infiltrasi perkolasi dan 421.844 jiwa	519 ± 75,00		86 ± 7,49	81	
Penelitian ini (2025)	Anaerobic Baffled Reactor (ABR) 53 SR	IPAL 1	454 ± 39,34	4933 ± 321,45	58 ± 14,05	85,75
		IPAL 2	325 ± 52,56	3800 ± 400	32 ± 12,29	85,85
		IPAL 3	510,67 ± 97,12	6333,3 ± 602,77	72 ± 14,42	85,75

Berdasarkan **Tabel 4.4** Penelitian-penelitian terkait penyisihan mikroplastik pada berbagai tipe pengolahan air limbah domestik menunjukkan kisaran konsentrasi influen, lumpur/partikulat, serta efluen yang sangat bervariasi tergantung desain dan skala instalasi. Pada penelitian dengan sistem *Anaerobic Upflow Filter* (AUF) menggunakan konfigurasi *single reactor*, media *Polyethylene Terephthalate* (PET) (Nur dkk., 2022) dengan sambungan rumah tangga 320 SR, konsentrasi mikroplastik di influen berkisar antara  $636,3 \pm 13,87$  hingga  $6.256,25 \pm 823,94$  partikel/L, sedangkan di lumpur turun drastis di kisaran  $88,7 \pm 4,2$  hingga  $157,67 \pm 4,04$  partikel/L. Efluen hasil pengolahan mencatat rentang variasi 78,90–90,34% efisiensi penyisihan.

Pada studi komparatif di Tiongkok (Hu dkk., 2022) terhadap 48 IPAL dengan tiga tipe proses berbeda (AAO, CASS, dan MBR), menggunakan konfigurasi *multi-stage* (3 tahap) konsentrasi mikroplastik efluen bervariasi dari 6,5 hingga 13,8 partikel/L, dengan efisiensi penyisihan rata-rata dari 83,9% (MBR) sampai 89,7% (AAO). Penelitian di Maroko (Hajji dkk., 2023) menggunakan konfigurasi *conventional* (aerasi dan *settling*) juga menemukan kisaran sebanding dengan sistem *activated sludge* berpenduduk 61.000 jiwa (efluen:  $50 \pm 6,20$  partikel/L, efisiensi 72%) dan sistem infiltrasi perkolasi dengan jumlah penduduk lebih besar (efluen:  $86 \pm 7,49$  partikel/L, efisiensi 81%). Penelitian ini, yang menggunakan ABR dengan konfigurasi *single reactor* skala komunal dengan 53 SR, melaporkan konsentrasi mikroplastik pada influen rata-rata  $454 \pm 39,34$  partikel/L, lumpur ABR  $4.933 \pm 321,45$  partikel/L, dan efluen  $58 \pm 14,05$  partikel/L. Efisiensi penyisihan rata-rata adalah 85,75%. Konsentrasi rata-rata untuk beberapa sesi sampling lainnya pada penelitian ini serupa, dengan nilai influen  $325 \pm 52,56$  dan  $510,67 \pm 97,12$  partikel/L, lumpur  $3.800 \pm 400$  dan  $6.333,3 \pm 602,77$  partikel/Kg, serta efluen  $32 \pm 12,29$  dan  $72 \pm 14,42$  partikel/L. Efisiensi penyisihan tetap konsisten sekitar 85,75–85,85%.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa proses biologis berbasis ABR memiliki kapabilitas yang cukup baik dalam menurunkan konsentrasi mikroplastik dari air limbah domestik, dengan efisiensi rata-rata di atas 85%. Nilai ini sebanding, bahkan pada beberapa kasus lebih tinggi, dibandingkan beberapa sistem konvensional di negara lain, asalkan operasi dan pemeliharaannya dilakukan

dengan baik. Namun, tetap diperlukan pendekatan tambahan maupun pengembangan teknologi lebih lanjut untuk memaksimalkan retensi total mikroplastik sebelum efluen dilepas ke lingkungan, terutama untuk menangkap partikel mikroplastik halus dan yang resisten terhadap proses biologis konvensional.

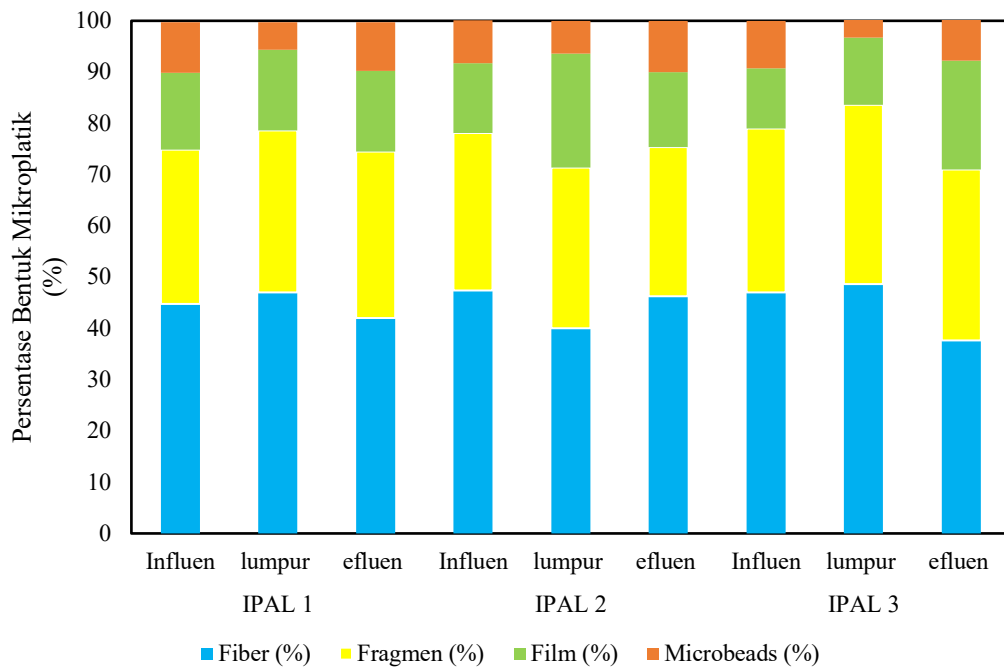
#### **1.4. Karakteristik Mikroplastik**

Karakteristik mikroplastik yang ditemukan pada sampel air limbah domestik dan lumpur IPAL ABR di Kecamatan Alam Barajo, Kota Jambi, dianalisis berdasarkan beberapa aspek, yaitu bentuk, warna, ukuran, dan jenis polimer. Analisis karakteristik ini bertujuan untuk mengetahui sumber potensi, perilaku lingkungan, serta implikasi kemungkinan dampak mikroplastik yang masih terlepas dari sistem pengolahan.

##### **a. Bentuk Mikroplastik**

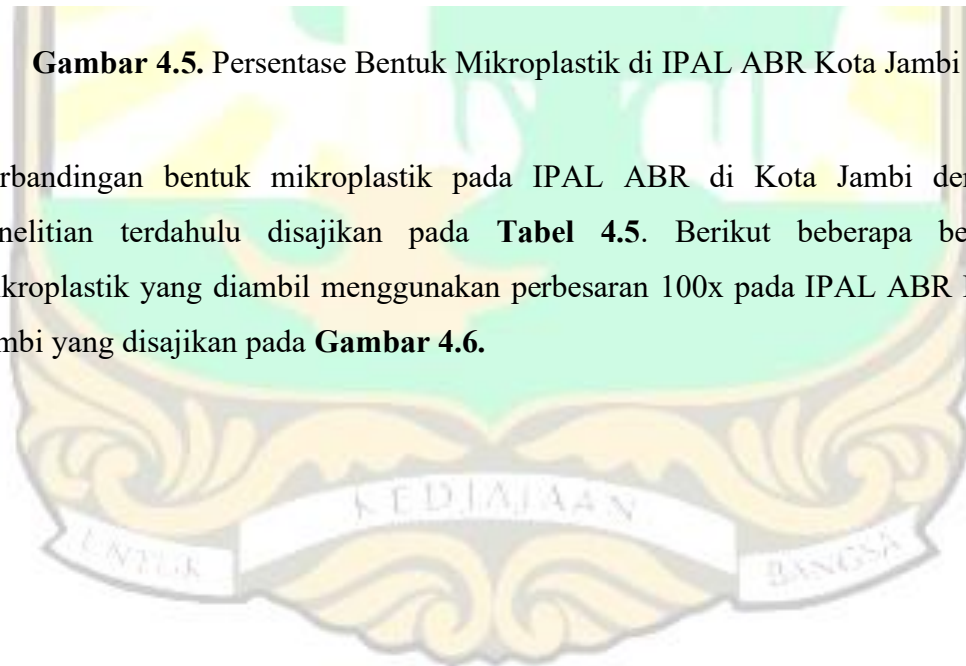
Analisis bentuk mikroplastik pada tiga titik sampling IPAL ABR Kota Jambi menunjukkan dominasi bentuk fiber di seluruh titik pengambilan sampel. Fiber diperkirakan berasal dari serat pakaian dan tekstil rumah tangga yang tercuci dan masuk ke sistem pengolahan air limbah. Persentase fiber tertinggi ditemukan pada lumpur IPAL 3 sebesar 57%, diikuti influen dan efluen dengan persentase fiber sekitar 42-52%. Bentuk mikroplastik lainnya yang ditemukan adalah fragmen yang berasal dari potongan plastik keras akibat degradasi mekanis dan kimiawi dalam saluran limbah. Fragmen ini menempati urutan kedua dengan persentase antara 24-35%. Selain itu, terdapat mikroplastik berbentuk film yang biasanya berasal dari kantong plastik dan kemasan tipis, dengan persentase berkisar 9-24%. *Microbeads* atau butiran mikroplastik bulat, yang umumnya berasal dari produk kosmetik dan pembersih, ditemukan dalam jumlah paling sedikit, dengan persentase sekitar 2-13%. Dominasi bentuk mikroplastik fiber mengindikasikan bahwa kegiatan domestik seperti pencucian pakaian menjadi sumber utama mikroplastik. Bentuk-bentuk lain menunjukkan keberadaan sumber plastik lain juga terdegradasi selama proses pengolahan. Variasi distribusi bentuk ini penting untuk dipahami karena mempengaruhi karakteristik pengendapan dan resistensi mikroplastik terhadap

metode pengolahan yang dilakukan di IPAL. Persentase bentuk Mikroplastik pada IPAL ABR Kota Jambi disajikan pada **Gambar 4.5**.



**Gambar 4.5.** Persentase Bentuk Mikroplastik di IPAL ABR Kota Jambi

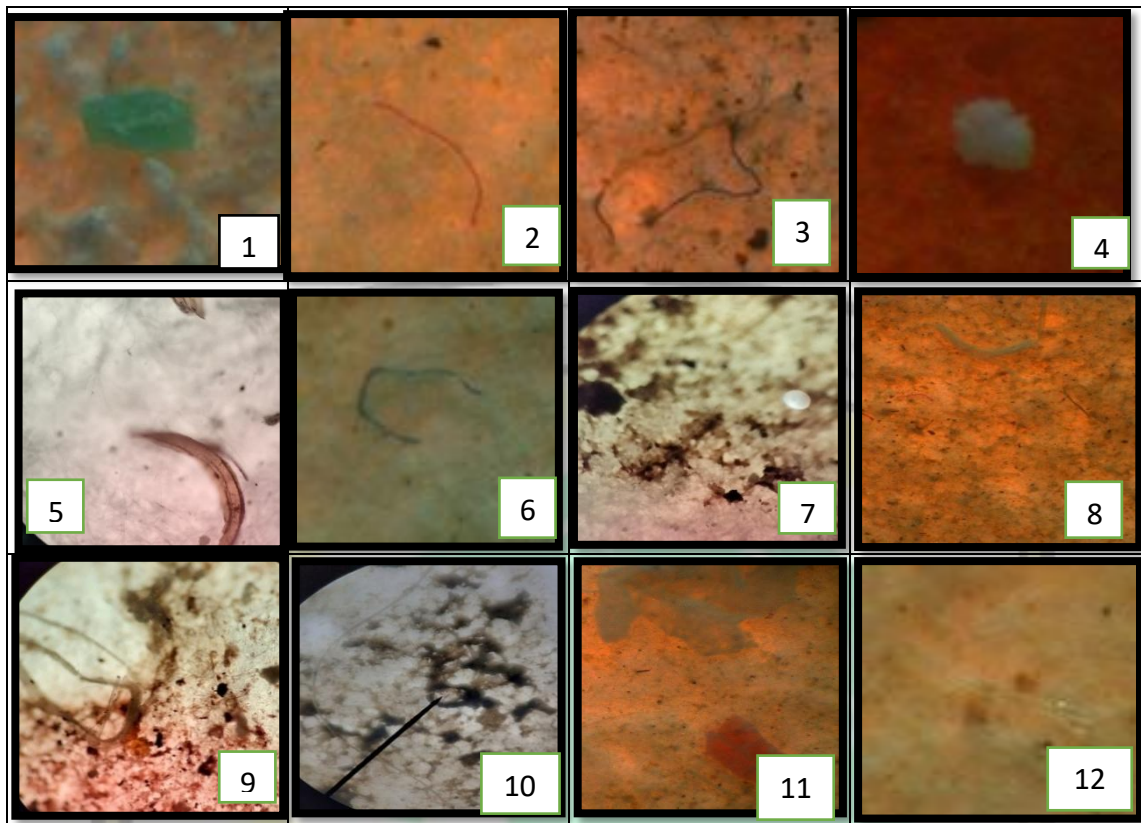
Perbandingan bentuk mikroplastik pada IPAL ABR di Kota Jambi dengan penelitian terdahulu disajikan pada **Tabel 4.5**. Berikut beberapa bentuk mikroplastik yang diambil menggunakan perbesaran 100x pada IPAL ABR Kota Jambi yang disajikan pada **Gambar 4.6**.



**Tabel 4.5.** Perbandingan Bentuk Mikroplastik Pada IPAL ABR Kota Jambi dengan Penelitian Terdahulu

No,	Penelitian	Tipe Pengolahan	Bentuk Mikroplastik	Persentase Dominan (%)		
				Influen	Lumpur	Efluen
1	<i>Polyethylene Terephthalate</i> (PET) sebagai media lekat pada reaktor <i>fixed bed</i> dalam pengolahan air limbah domestik dan keberadaannya di dalam reaktor sebagai mikroplastik Nur dkk., (2022)	<i>Anaerobic Upflow Filter</i> (AUF))	Fiber	60,2 -70	Sekitar 50 – 60	Sekitar 50
			Fragmen	21,99 – 34,1	Sekitar 20 -30	Sekitar 20
			<i>Microbeads</i>	1,33 – 4,5	Sekitar <10	Sekitar <10
			lainnya	0,98 – 3,37	Sekitar <10	Sekitar <10
2	Penguraian mikroplastik di IPAL: Studi perbandingan dua IPAL di Thailand (Tadsuwan & Babel, 2022)	<i>Activated sludge</i> dan kombinasi <i>activated sludge</i> dan <i>ultrafiltration</i>	Fiber	45-89	26-79	64-78
			Fragmen	5-37	11-58	20-27
			Film	6-18	10-16	2-9
			<i>Microbeads</i>	0	0	0
3	Kemunculan dan distribusi mikroplastik di instalasi pengolahan air limbah di wilayah tropis China (Bao dkk., 2022)	Anaerobik, aerobik, dan oksik	Fiber	81,52	50,72	81,52
			Fragmen	14,97	43,51	14,97
			<i>Microbeads</i>	3,23	5,46	3,23
			lainnya	0,28	0,31	0,28
4	Penelitian ini (2025)	IPAL 1 <i>Anaerobic Baffled Reactor</i>	Fiber	44,79	47	42,07
			Fragmen	30,08	31,67	32,40
			Film	15,04	15,67	15,71
			<i>Microbeads</i>	9,76	5,33	9,48
		IPAL 2 <i>Anaerobic Baffled Reactor</i>	Fiber	47,33	40	46,22
			Fragmen	30,67	31,33	29,09
			Film	13,67	22,33	14,68
			<i>Microbeads</i>	8,33	6,33	10,01
		IPAL 3 <i>Anaerobic Baffled Reactor</i>	Fiber	47	48,67	37,70
			Fragmen	32	35	33,32
			Film	11,67	13	21,27
			<i>Microbeads</i>	9,33	7	8,38

Berdasarkan **Tabel 4.5** secara umum, bentuk fiber (serat) merupakan tipe mikroplastik yang paling dominan ditemukan di berbagai IPAL domestik, baik pada influen, lumpur, maupun efluen. Pada penelitian Nur dkk, (2022) dengan sistem *Anaerobic Upflow Filter* (AUF), fiber mendominasi hingga 60,2–70% pada influen, sekitar 50–60% pada lumpur, dan sekitar 50% pada efluen. Fragmen menjadi bentuk kedua terbanyak (21,99–34,1%), sementara *microbeads* dan tipe lainnya (seperti foam dan pellet) masing-masing berada di kisaran <10% baik pada influen, lumpur maupun efluen. Studi perbandingan IPAL di Thailand oleh Tadsuwan & Babel (2022) dengan *activated sludge* dan kombinasi ultrafiltrasi menunjukkan pola dominasi bentuk fiber pada semua tahapan proses dengan rentang 45–89% pada influen, 26–79% di lumpur, dan 64–78% pada efluen.



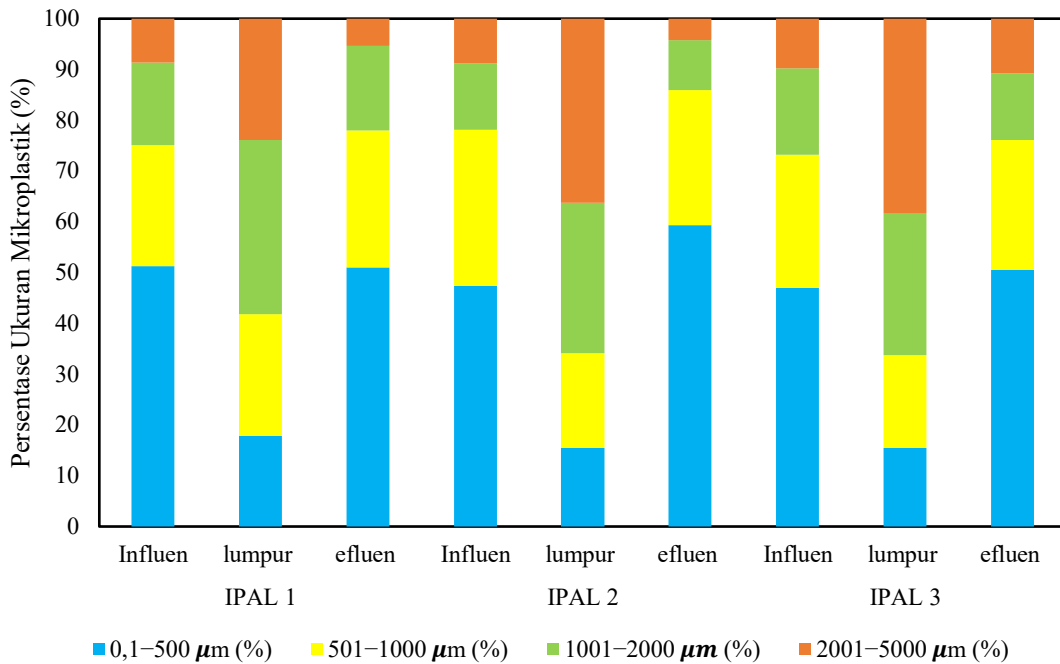
**Gambar 4.6.** Bentuk, Ukuran dan Warna Mikroplastik dengan perbesaran 100x (1), *Microbeads* biru, (2), Fiber merah, (3), Fiber hitam, (4), *Microbeads* putih, (5), Fragmen merah, (6), Fiber biru, (7), *Microbeads* putih, (8), Fragmen biru (9), Film merah, (10), Fragmen transparan, (11), Film Merah, (12). Film Transparan.

#### **b. Ukuran Mikroplastik**

Ukuran mikroplastik yang terdeteksi pada tiga lokasi IPAL ABR di Kota Jambi bervariasi antara 0,1-5000  $\mu\text{m}$ . Distribusi ukuran menunjukkan bahwa mikroplastik dengan ukuran 100-1000  $\mu\text{m}$  merupakan ukuran dominan pada fiber, sedangkan fragmen lebih banyak ditemukan dalam kisaran ukuran 1000-5000 $\mu\text{m}$ . Adanya partikel mikroplastik ukuran kecil dibawah 500  $\mu\text{m}$  pada titik efluen menunjukkan proses fragmentasi selama transportasi air limbah yang menyebabkan partikel plastik terpecah menjadi ukuran yang lebih kecil. Proses fragmentasi ini terjadi pada saluran pipa limbah dan dalam reaktor pengolahan, sehingga menghasilkan konsentrasi partikel mikroplastik yang lebih kecil pada efluen.

Mikroplastik yang berukuran kecil umumnya lebih sulit dipisahkan oleh sistem pengolahan dan memungkinkan untuk lolos ke efluen, sehingga keberadaan partikel

mikroplastik berukuran kecil ini penting untuk menjadi perhatian dalam perancangan unit *post-treatment*. Distribusi ukuran mikroplastik pada ketiga IPAL



**Gambar 4.7.** Distribusi Ukuran Mikroplastik di IPAL ABR Kota Jambi

**Tabel 4.6.** Perbandingan Distribusi Ukuran Mikroplastik di IPAL ABR Kota Jambi dengan Penelitian Terdahulu

No,	Penelitian	Tipe Pengolahan	Bentuk Mikroplastik (µm)	Persentase Dominan (%)		
				Influen	Lumpur	Efluen
1	<i>Polyethylene Terephthalate (PET)</i> sebagai media lekat pada reaktor <i>fixed bed</i> dalam pengolahan air limbah domestik dan keberadaannya di dalam reaktor sebagai mikroplastik (Nur dkk., 2022)	<i>Anaerobic Upflow Filter (AUF)</i>	20–100 101–300 301–500 501–1000 1001–5000	30,22–40,49 20–30 10–20 <10–20 <10	11,84–40,49 20–30 10–20 <10–20 <10	41,73–55,26 20–30 10–20 <10–20 <10
2	<i>Penguraian mikroplastik di IPAL: Studi perbandingan dua IPAL di Thailand (Tadsuwan &amp; Babel, 2022)</i>	<i>Activated sludge dan kombinasi activated sludge dan ultrafiltration</i>	50–500 500–1000 1000–5000	62 26 12	64 21 15	-
3	<i>Mikroplastik di 48 IPAL menganalisis perbedaan regional dalam karakteristik fisik dan penyisihan yang bergantung pada zona transisi antara china utara dan selatan (Hu dkk., 2022)</i>	<i>Anaerobik, Anoksik dan Aerobik (AAO), Sistem Lumpur Aktif Siklik (CASS) dan Bioreaktor Membran (MBR)</i>	0–500 500–1000 1000–2000 2000–5000	> 90 > 30 > 15 < 5	-	> 90 > 30 > 15 < 5
4	<i>Kemunculan penyisihan mikroplastik di instalasi pengolahan air limbah di kota wisata Tiongkok (Zhang dkk., 2021)</i>	<i>Anaerobik, Anoksik dan Aerobik (AAO)</i>	> 500 200–500 100–200 < 100	-	25-67 22-50 9-14 1-13	
5	<i>Distribusi mikroplastik dalam lumpur instalasi pengolahan air limbah di Chengdu, China (Wei dkk., 2022b)</i>	<i>Sistem Lumpur Aktif Siklik</i>	4–5 3–4 1–2 2–3 0,8–1 0,5–0,8 <0,5	-	20,18 18,35 15,14 14,68 12,39 6,88 12,38	
6	Penelitian saat ini (2025)	IPAL ABR	0,1 -500 501 – 1000 1001- 2000 2001- 5000	49,98 27,42 19,05 25,39	16,94 20,44 30,99 33,27	62,34 32,51 17,82 9,39

**Tabel 4.6** menyajikan perbandingan distribusi ukuran mikroplastik yang ditemukan pada IPAL ABR di Kota Jambi dan berbagai penelitian terdahulu. Tabel ini menggambarkan bahwa mikroplastik yang teridentifikasi di seluruh sistem pengolahan air limbah cenderung memiliki dominasi partikel berukuran kecil, khususnya pada fraksi 20–100 $\mu\text{m}$  dan 101–500 $\mu\text{m}$ . Studi Nur dkk, (2022) yang menggunakan *Anaerobic Upflow Filter* (AUF) menunjukkan bahwa persentase terbesar mikroplastik di influen berkisar antara 30,32–40,49% untuk ukuran 20–100 $\mu\text{m}$ , dengan penurunan bertahap pada lumpur dan efluen, namun ukuran kecil tetap mendominasi hasil akhir. Ukuran 501–1000 $\mu\text{m}$  dan lebih besar (<10%) hanya ditemukan dalam persentase yang jauh lebih rendah.

Penelitian oleh Tadsuwan & Babel (2022) serta Hu dkk. (2022) pada sistem *activated sludge* dan kombinasi lain juga menampilkan pola serupa, dimana partikel mikroplastik berukuran 50–500 $\mu\text{m}$  dan dibawah 500 $\mu\text{m}$  menjadi fraksi dominan baik di influen, lumpur, maupun efluen. Penelitian lain (Ghazii et al., 2023; Wei dkk., 2022b) mendukung temuan tersebut dengan mayoritas partikel mikroplastik di air limbah domestik berukuran <500 $\mu\text{m}$ .

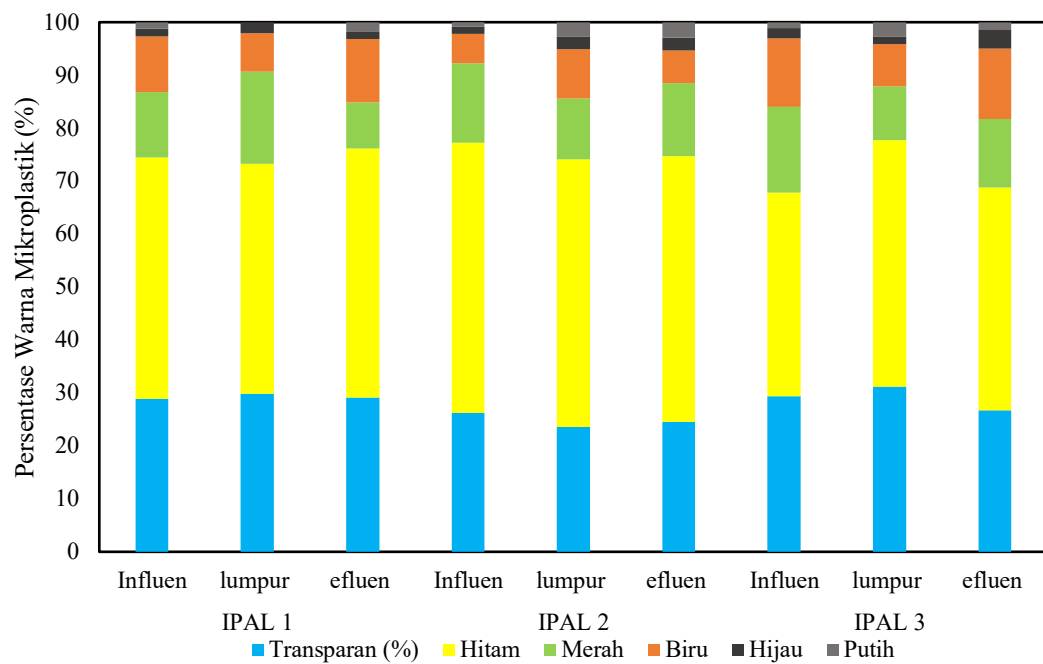
Hasil penelitian ini pada IPAL ABR di Kota Jambi menunjukkan pola serupa, di mana kelompok ukuran 20–100 $\mu\text{m}$  menyumbang hingga 49,88% pada influen, 62,34% pada lumpur, serta 64,34% pada efluen. Mikroplastik berukuran 101–500 $\mu\text{m}$  juga menonjol, dengan proporsi 35,40% di influen dan ~30% di lumpur dan efluen, sementara partikel mikroplastik dengan ukuran lebih besar (>1000 $\mu\text{m}$ ) hanya ditemukan kurang dari 10% dari total keseluruhan.

### **c. Warna Mikroplastik**

Pengamatan warna mikroplastik di tiga titik sampling IPAL ABR Kota Jambi menunjukkan adanya beragam warna, namun sebagian besar mikroplastik yang ditemukan memiliki warna transparan atau putih, yang merupakan warna dominan dengan persentase sekitar 34% hingga 40% di influen maupun efluen

Selain warna transparan, warna mikroplastik lain yang banyak ditemukan adalah hitam dan biru, dengan persentase berkisar antara 11-23%. Warna merah, hijau, coklat, dan kuning juga terdeteksi, tetapi dalam persentase yang jauh lebih kecil. Dominasi warna transparan dan putih menunjukkan sumber utama mikroplastik berasal dari limbah domestik rumah tangga seperti pakaian, kemasan plastik tipis,

dan produk plastik sekali pakai. Warna hitam dan biru diduga berasal dari serat tekstil dan partikel plastik dari aktivitas rumah tangga lainnya. Distribusi warna mikroplastik ini sejalan dengan hasil penelitian terdahulu yang juga melaporkan warna transparan dan hitam sebagai warna dominan pada mikroplastik di instalasi pengolahan air limbah domestik. Untuk distribusi warna mikroplastik disajikan pada **Gambar 4.8**. Perbandingan distribusi warna mikroplastik pada IPAL ABR di Kota Jambi disajikan pada **Tabel 4.7**.



**Gambar 4.8.** Distribusi Warna Mikroplastik pada IPAL ABR Kota Jambi



**Tabel 4.7.** Perbandingan Warna Mikroplastik di IPAL ABR Kota Jambi dengan Penelitian Terdahulu

No,	Penelitian	Tipe Pengolahan	Warna Mikroplastik	Persentase Dominan (%)		
				Influen	Lumpur	Efluen
1	Identifikasi mikroplastik pada Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) permukiman di Kecamatan Meuraxa Kota Banda Aceh (Liza, 2023)	-	Transparan Biru Merah Coklat Hijau Ungu Kuning Lainnya	19,7–26,3 8–10,7 0–3,7 0–3,3 4,3–7,7 14–18,3 0,3–1 0,3–2		9,7–12,7 1,7–4,7 0–2,3 0–1,7 1–4 6,3–8,7 0–0,3 0–0,3
2	Kelimpahan dan karakteristik mikroplastik di IPAL perkotaan di Turki (Üstün dkk., 2022)	Anaerobik, Anoksik dan Aerobik (AAO) + <i>activated sludge</i>	Hitam Transparan Biru Putih Merah Hijau, pink dan oren	35,3–45,6 19,5–27,1 9,7–13,9 8,5–9,7 5,5–7,6 < 5	29,0–40,4 29,7–34,3 9,5–12,2 5,7–8,0 6,6–7,2 < 5	35,3–45,6 19,5–27,1 9,7–13,9 8,5–9,7 5,5–7,6 < 5
3	<i>Polyethylene Terephthalate</i> (PET) sebagai media lekat pada reaktor <i>fixed bed</i> dalam pengolahan air limbah domestik dan keberadaannya di dalam reaktor sebagai mikroplastik Nur dkk, (2022)	<i>Anaerobic Upflow Filter</i> (AUF)	Transparan Biru Merah  Coklat Hijau Ungu Kuning Lainnya		Sekitar 20-30 Sekitar 20 Sekitar 10  <10	
4	Kemunculan dan distribusi mikroplastik di instalasi pengolahan air limbah di wilayah tropis China (Bao dkk., 2022)	Anaerobik, aerobik, dan oksik	Hitam Transparan Kuning Biru Merah Putih	53,73 16,13 9,71 9,24 7,22 3,97		53,73 16,13 9,71 9,24 7,22 3,97
5	Penelitian saat ini (2025)	Anaerobic Baffled Reactor (ABR)	Transparan Hitam, Merah Biru Hijau Putih	28,13 45,02 14,50 9,74 1,54 1,07	28,22 46,78 13,04 8,21 1,98 1,78	26,80 46,38 11,86 10,45 2,46 2,05

Berdasarkan **Tabel 4.7.** hasil penelitian-penelitian terkait identifikasi dan karakteristik mikroplastik di unit pengolahan air limbah domestik, ditemukan variasi warna dan persentase mikroplastik yang dominan pada influen, lumpur, dan efluen. Pada IPAL permukiman di Banda Aceh (Liza, 2023), warna mikroplastik yang paling banyak ditemukan adalah transparan, biru, merah, coklat, hijau, ungu, dan kuning, dengan persentase dominan di influen berkisar antara 19,7–26,3% untuk transparan, sedangkan di lumpur dan efluen menurun hingga 9,7–12,7%. Pola ini menunjukkan terdapat pengurangan jumlah mikroplastik tertentu selama proses pengolahan, meski beberapa warna mikroplastik lain tetap ditemukan dalam jumlah kecil.

Penelitian di IPAL perkotaan Turki oleh Üstün dkk. (2022) yang menggunakan kombinasi proses anaerobik, anoksik, aerobik dengan *activated sludge*

menunjukkan dominasi mikroplastik berwarna hitam (35,3–45,6%) dan transparan (19,5–27,1%) pada seluruh aliran sampel (influen, lumpur, efluen).

Mikroplastik biru, putih, merah, serta hijau, pink, dan oren juga ditemukan namun dengan persentase yang jauh lebih kecil (<5–13,9%). Demikian pula pada studi di China (Bao dkk., 2022), warna hitam dan transparan tetap mendominasi dengan persentase di atas 50%. Penelitian menggunakan AUF oleh Nur dkk, (2022) menunjukkan dominasi warna transparan dan biru, sementara warna lain seperti coklat, hijau, dan ungu tetap ditemukan meski persentasenya <10%. Hal ini mengindikasikan bahwa media filter AUF cenderung menangkap mikroplastik tertentu secara lebih efisien.

Adapun hasil penelitian saat ini pada unit ABR, ditemukan bahwa warna mikroplastik yang paling dominan, baik di influen, lumpur, maupun efluen, adalah hitam dan transparan dengan persentase bertingkat dari influen ke efluen. Pada influen, mikroplastik hitam mencapai 45,02% sementara transparan 28,13%. Setelah proses di ABR, selain di lumpur mikroplastik hitam meningkat menjadi 46,78% dan transparan relatif stabil pada 28,22%. Pada efluen, kedua jenis ini masih mendominasi (hitam 46,38%; transparan 26,80%) meskipun terlihat penurunan pada mikroplastik biru, merah, putih, dan hijau. Penurunan ini mencerminkan efektivitas proses ABR dalam mengurangi mikroplastik tertentu, serta kecenderungan akumulasi warna hitam dan transparan selama proses pengolahan. Persentase warna minor seperti merah, biru, hijau, dan putih tetap terdeteksi namun kontribusinya jauh di bawah 15%.

Dari data ini dapat disimpulkan bahwa karakteristik dominan mikroplastik pada sistem pengolahan air limbah domestik, termasuk ABR, cenderung didominasi warna hitam dan transparan. Jenis proses dan tahapan pengolahan sangat mempengaruhi distribusi dan kelimpahan warna mikroplastik, dengan efisiensi berbeda pada setiap tahapan, baik dalam retensi maupun pelepasan ke lingkungan. Penemuan mikroplastik dengan warna minor pada efluen menandakan masih perlunya pengembangan teknologi tambahan untuk memaksimalkan reduksi mikroplastik pada air limbah domestik sebelum dilepaskan ke lingkungan.

#### d. Analisis Polimer Mikroplastik menggunakan FTIR

Analisis jenis polimer mikroplastik pada sampel dari ketiga IPAL ABR dilakukan menggunakan FTIR. Metode ini memungkinkan identifikasi spektrum serapan khas dari jenis polimer yang menyusun partikel mikroplastik.

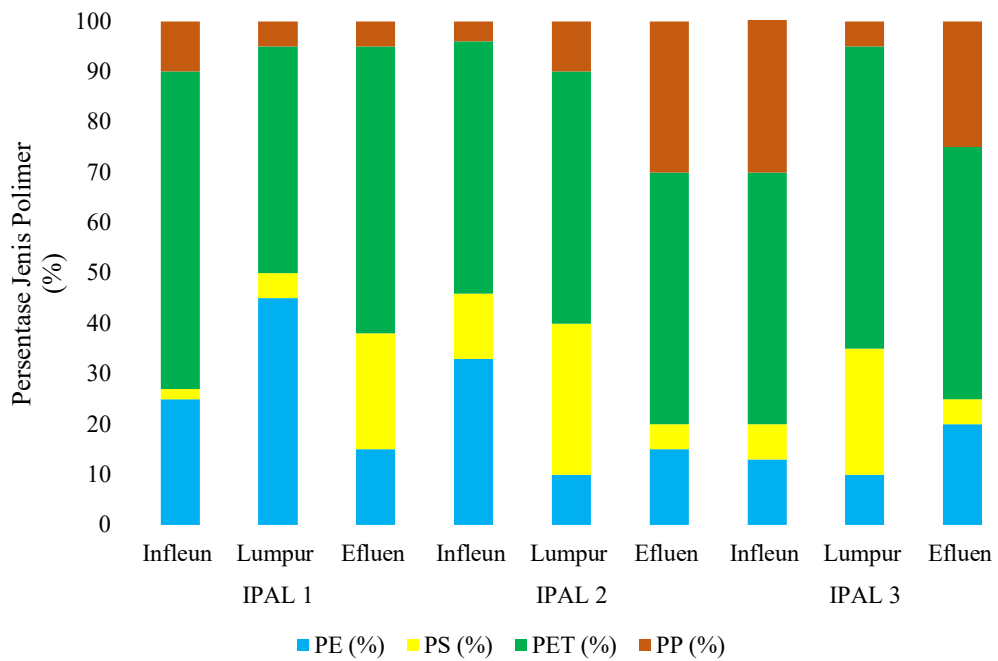
Hasil analisis FTIR menunjukkan bahwa jenis polimer dominan yang ditemukan adalah *polyethylene terephthalate* (PET), *polypropylene* (PP), dan *polyethylene* (PE). Polimer PET ditemukan paling banyak, yang merupakan bahan umum pada tekstil pakaian dan botol minuman plastik. Kemudian, polimer PP dikaitkan dengan kemasan plastik dan peralatan rumah tangga, sedangkan PE sering digunakan pada kantong plastik dan berbagai produk kemasan.

Spektrum FTIR yang diperoleh memperlihatkan puncak serapan utama sesuai dengan referensi polimer standar, seperti puncak serapan pita karbonil pada PET di sekitar  $1715\text{ cm}^{-1}$  dan pita  $\text{CH}_2$  pada PE dan PP di sekitar  $2915\text{ cm}^{-1}$  dan  $2848\text{ cm}^{-1}$ . Keakuratan identifikasi polimer ini mendukung validasi sumber mikroplastik dan analisis risiko pencemaran yang ditimbulkan. Analisis jenis polimer ini penting untuk memahami asal-usul mikroplastik dan merancang strategi pengelolaan limbah yang efektif dalam mengurangi dampak pencemaran plastik di lingkungan perkotaan.

Polimer Mikroplastik yang berasal dari influen yaitu: PE sebesar 13-33%, PA sebesar 2-13%, PET sebesar 50-63%, dan PP sebesar 4-33%. Dari lumpur yaitu: PE sebesar 10-45%, PA sebesar 0-30%, PET sebesar 50-60%, dan PA sebesar 5-105. Dan dari efluen yaitu: PE sebesar 15-20%, PA sebesar 5-23%, PET sebesar 50-57%. Hasil analisis mikroplastik menggunakan FTIR disajikan pada **Tabel 4.8.** dan grafik persentase polimer Mikroplastik di IPAL ABR Kota Jambi disajikan pada **Gambar 4.9.**

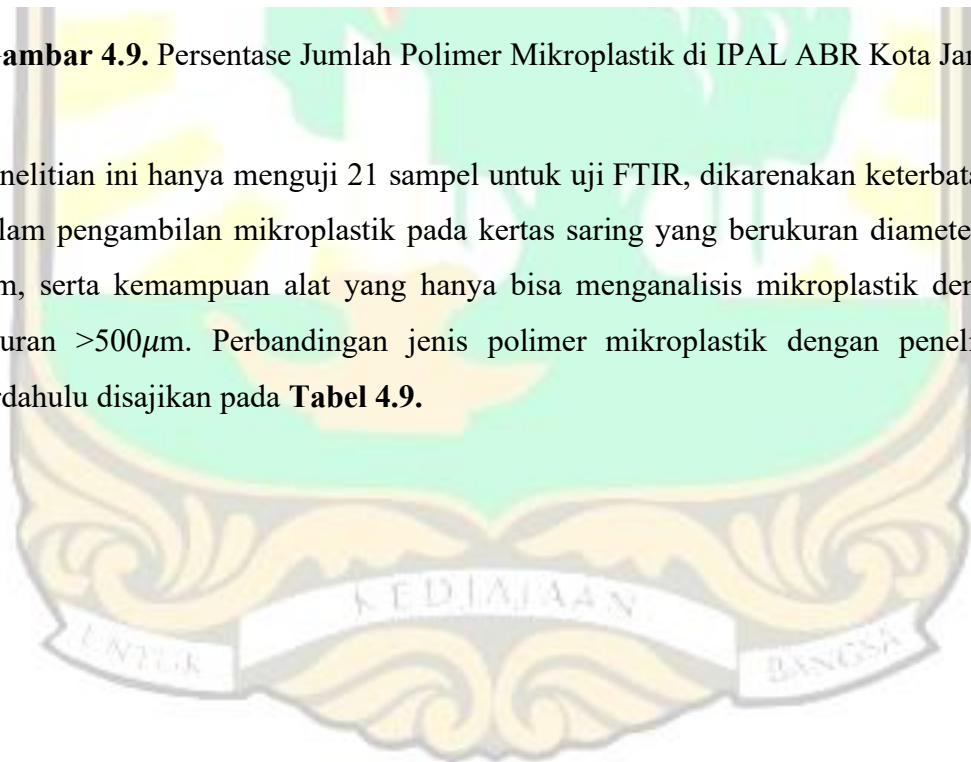
**Tabel 4.8.** Hasil Analisis Mikroplastik Menggunakan FTIR

Jenis Polimer	IPAL 1			IPAL 2			IPAL 3		
	Infleun	Lumpur	Efluen	Infleun	Lumpur	Efluen	Infleun	Lumpur	Efluen
PE	2	2	0	2	0	0	0	0	0
PA	1	0	2	0	2	0	1	0	0
PET	4	2	3	3	2	2	2	2	1
PP	0	0	0	0	0	2	0	0	1



**Gambar 4.9.** Persentase Jumlah Polimer Mikroplastik di IPAL ABR Kota Jambi

Penelitian ini hanya menguji 21 sampel untuk uji FTIR, dikarenakan keterbatasan dalam pengambilan mikroplastik pada kertas saring yang berukuran diameter 47 mm, serta kemampuan alat yang hanya bisa menganalisis mikroplastik dengan ukuran  $>500\mu\text{m}$ . Perbandingan jenis polimer mikroplastik dengan penelitian terdahulu disajikan pada **Tabel 4.9**.



**Tabel 4.9.** Perbandingan Jenis Polimer Mikroplastik dengan Penelitian Terdahulu

No,	Penelitian	Tipe Pengolahan	Warna Mikroplastik	Persentase Dominan (%)		
				Influen	Lumpur	Efluen
1	<i>Polyethylene Terephthalate</i> (PET) sebagai media lekat pada reaktor <i>fixed bed</i> dalam pengolahan air limbah domestik dan keberadaannya di dalam reaktor sebagai mikroplastik Nur dkk, (2022)	<i>Anaerobic Upflow Filter</i> (AUF)	PES PE PET PS	Sekitar 40-60 Sekitar 10-30 Sekitar <10-20		
2	Kemunculan dan distribusi mikroplastik di instalasi pengolahan air limbah di wilayah tropis China (Bao dkk, 2022)	Anaerobik, aerobik, dan oksik	PET PP PA PE Rayon PS Olefin PVC Acrylic	41,68 15,08 14,81 14,16 11,24 1,93 0,38 0,51 0,21		41,68 15,08 14,81 14,16 11,24 1,93 0,38 0,51 0,21
3	Penguraian mikroplastik di IPAL: Studi perbandingan dua IPAL di Thailand (Tadsuwan & Babel, 2022)	<i>Activated sludge</i> dan kombinasi <i>activated sludge</i> dan <i>ultrafiltration</i>	PET PE PP Acylate PS PA PU Alkyd	41,54 30,77 9 7 3,69 3 3 2		
4	Penelitian Ini (2025)	ABR Komunal	PE PA PP PET	24 7 57 16	22 18 53 7	17 11 52 20

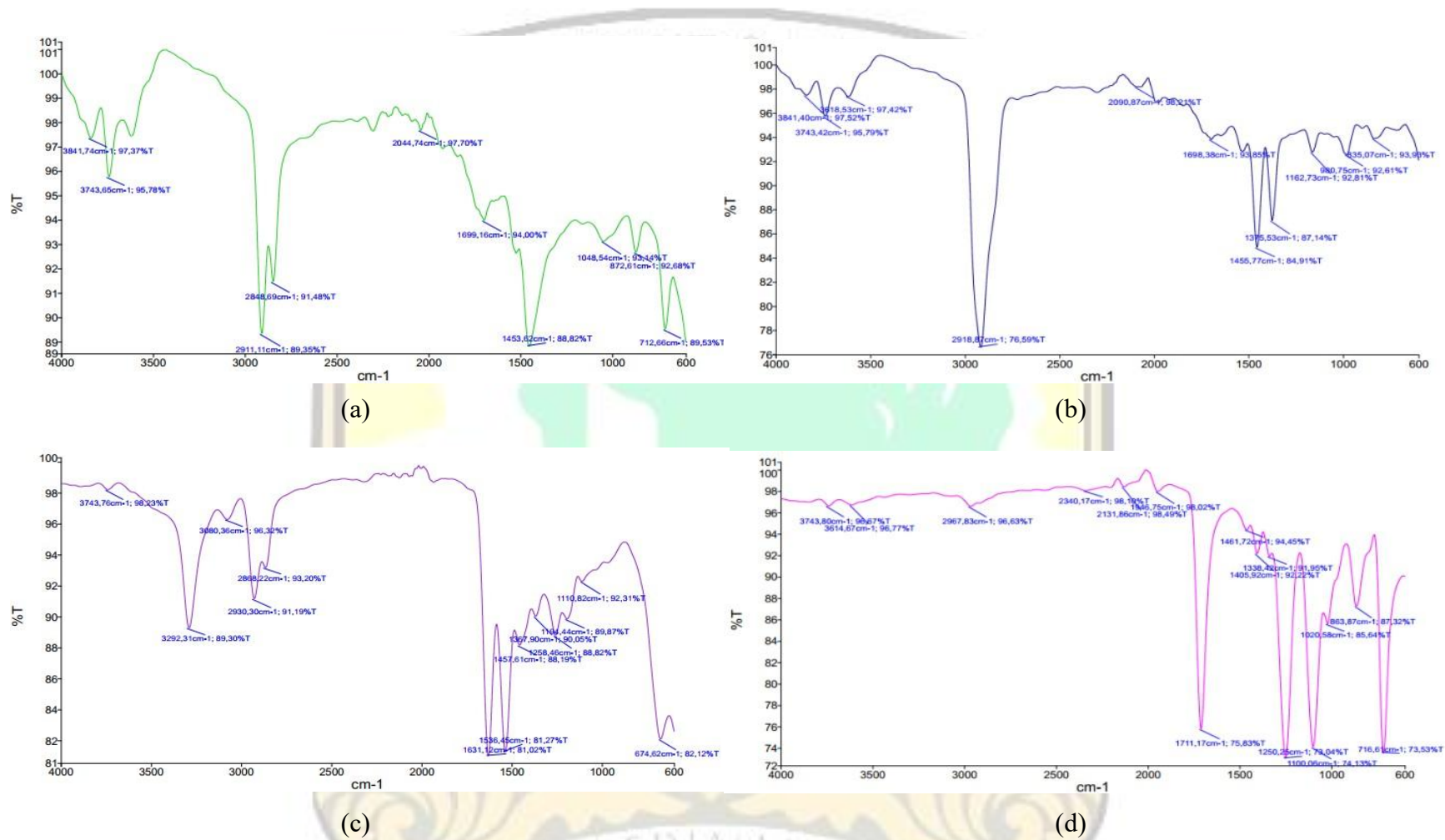
Berdasarkan **Tabel 4.9** penelitian dari beberapa negara, mikroplastik yang umum ditemukan di Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) domestik memiliki variasi komposisi polimer yang cukup khas tergantung pada proses pengolahan dan karakter limbah. Pada penelitian Nur dkk, (2022) dengan media Polyethylene Terephthalate (PET) di Anaerobic Upflow Filter (AUF), dominasi mikroplastik ditemukan berturut-turut pada jenis PES (sekitar 40-60%), PE (sekitar 10-30%) dan PET serta PS masing-masing kurang dari 10-20%, baik di influen, lumpur, maupun efluen. Pola dominan ini menandakan peran media filter dalam menangkap dan menahan mikroplastik berstruktur serupa.

Penelitian di China (Bao dkk., 2022) yang menggunakan beberapa tahapan proses (anaerobik, aerobik, oksik) menunjukkan mikroplastik PET sebagai dominan utama (41,68%), diikuti oleh PP (15,08%), PA (14,81%), dan PE (14,16%). Komponen minor seperti rayon, PS, olefin, PVC, dan acrylic ditemukan dalam jumlah jauh lebih kecil (<12%). Persentase komposisi tersebut relatif konsisten antara influen dan efluen, menandakan efisiensi pengolahan belum sepenuhnya mampu menangkap atau mengeliminasi mikroplastik dengan jenis tertentu, terutama PET.

Studi IPAL di Thailand (Tadsuwan & Babel, 2022) dengan Unit *Activated Sludge* dan kombinasi ultrafiltrasi, juga menemukan pola yang serupa, di mana PET (41,54%), PE (30,77%), dan PP (9%) menjadi polimer utama pada mikroplastik yang teridentifikasi, dan disusul oleh acrylic, PS, PA, PU, dan alkyd yang masing-masing kontribusinya <7%, memberi gambaran bahwa limbah domestik sangat dipengaruhi oleh kebiasaan dan produk yang dipakai masyarakat setempat.

Penelitian saat ini pada unit ABR Komunal (2025), ditemukan pola distribusi sedikit berbeda. Pada influen, mikroplastik PP (57%) menjadi paling dominan, diikuti PET (16%), PE (24%), dan PA (7%). Setelah melewati proses ABR, proporsi PP sedikit menurun di lumpur (53%) dan meningkat pada efluen (52%), menunjukkan bahwa partikel PP cenderung lolos dari proses, meski masih ada sebagian yang tertahan di lumpur. Polimer PET juga masih ditemukan cukup tinggi setelah proses, sedangkan PE dan PA jumlahnya cenderung fluktuatif namun tetap berada di bawah 24%. Proses ABR menunjukkan efisiensi berbeda pada setiap jenis polimer dan mengindikasikan bahwa mikroplastik tipe PP dan PET paling resistan/tidak mudah tertahan oleh proses biologis dan sedimentasi, sementara PE dan PA cenderung mengalami penurunan secara gradual.

Secara umum, review beberapa studi di atas menunjukkan bahwa jenis mikroplastik PP, PET, PE, dan PA adalah yang paling banyak dijumpai pada air limbah domestik, baik sebelum maupun setelah proses pengolahan biologis, dan efisiensi retensi sangat dipengaruhi oleh tipe polimer dan unit pengolahan yang digunakan. Integrasi tambahan tahap filtrasi fisik/kimia masih diperlukan untuk memaksimalkan penangkapan mikroplastik yang resisten terhadap proses konvensional. Spektrum FTIR pada IPAL ABR Kota Jambi disajikan pada **Gambar 4.10**.



Gambar 4.10. Spektrum FTIR yang Representatif pada IPAL tipe AUF di Kota Jambi: a) PE, b) PP, c) PA, d) PET

**Gambar 4.10** menampilkan spektrum FTIR yang representatif untuk identifikasi polimer mikroplastik pada IPAL ABR di Kota Jambi. Terdapat empat grafik spektrum yang masing-masing menunjukkan hasil analisis FTIR untuk jenis polimer utama yang ditemukan, yaitu: (a) *Polyethylene* (PE), (b) *Polypropylene* (PP), (c) Polyamide (PA), dan (d) *Polyethylene Terephthalate* (PET). Setiap grafik menampilkan pola serapan karakteristik pada daerah bilangan gelombang tertentu yang sesuai dengan fungsi khas milik tiap polimer.

- Spektrum PE (a) memiliki puncak pada rentang bilangan gelombang sekitar 2850–2950  $\text{cm}^{-1}$  yang menandakan adanya gugus C-H *stretch* dari rantai alkana.
- Spektrum PP (b) juga menunjukkan pola serapan C-H tetapi dengan karakteristik tambahan pada 1377  $\text{cm}^{-1}$  dan 1455  $\text{cm}^{-1}$  yang mengindikasikan getaran CH<sub>2</sub> dan CH<sub>3</sub> khas *polypropylene*.
- (c), spektrum PA memiliki puncak serapan pada 3298  $\text{cm}^{-1}$  (N-H *stretch*) serta 1634 dan 1650  $\text{cm}^{-1}$  (C=O *stretch*), menandakan keberadaan gugus amida yang merupakan ciri khas polimer *polyamide*.
- Sementara pada gambar (d) untuk PET, terlihat gugus C-O *stretch* dan *ester* dengan puncak intens pada sekitar 1713  $\text{cm}^{-1}$  (C=O *stretch*) serta 1241 dan 1094  $\text{cm}^{-1}$ , menandakan struktur aromatik dan *ester milik polyester*.

Empat spektrum FTIR berhasil memastikan identitas polimer utama mikroplastik di air limbah dan lumpur IPAL Jambi. Keakuratan identifikasi didukung oleh pola spektrum dan posisi bilangan gelombang yang sesuai pustaka, dengan tingkat kecocokan (*matching percentage*)  $\geq 70\%$ . Hasil ini memvalidasi distribusi dan persentase polimer pada tabel sebelumnya, serta memperkuat metode FTIR sebagai acuan identifikasi polimer mikroplastik secara analitik dan komparatif dengan penelitian lain

### 1.5. Korelasi TSS dan BOD, COD dan TSS dengan Mikroplastik

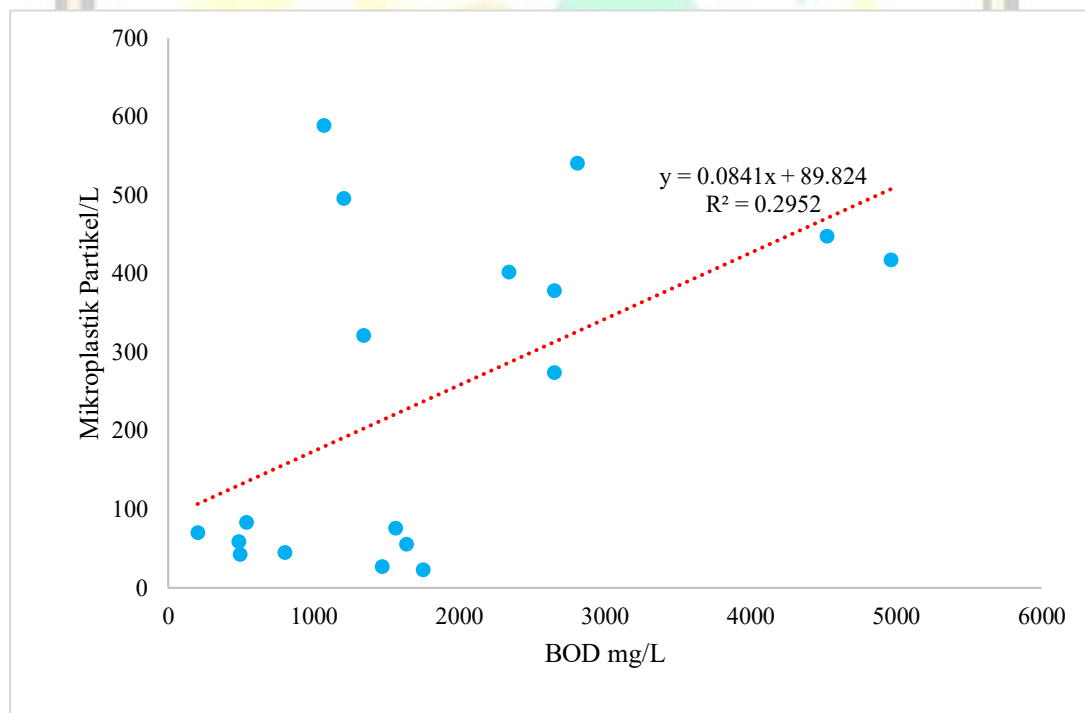
Korelasi antara BOD, TSS, dan mikroplastik penting dianalisis untuk memahami keterkaitan perilaku polutan konvensional dengan polutan *emerging* di sistem IPAL ABR Kota Jambi. Secara teoritis, mikroplastik cenderung berasosiasi dengan fraksi organik dan padatan tersuspensi sehingga penurunan BOD dan TSS pada proses

pengolahan akan diikuti oleh penurunan konsentrasi mikroplastik. Analisis pada data influen dan efluen ketiga IPAL menunjukkan pola bahwa titik dengan TSS dan BOD yang lebih tinggi umumnya memiliki konsentrasi mikroplastik yang lebih besar, baik pada bagian hulu maupun hilir pengolahan.

Hasil pembahasan pada subbab sebelumnya menunjukkan bahwa penurunan BOD dan TSS di ketiga IPAL mencapai lebih dari 60–70%, sedangkan efisiensi penyisihan mikroplastik berada pada kisaran 80–90%. Kecenderungan peningkatan efisiensi penyisihan mikroplastik sejalan dengan penurunan BOD dan TSS memperkuat hipotesis bahwa keberadaan mikroplastik sangat dipengaruhi oleh fraksi organik dan padatan dalam air limbah. Dengan demikian, optimasi proses fisik dan biologis yang menargetkan TSS dan BOD secara tidak langsung juga meningkatkan kemampuan sistem ABR dalam menurunkan mikroplastik.

### 1. BOD terhadap mikroplastik

Secara mekanisme, BOD berperan sebagai bahan organik terlarut dan tersuspensi membentuk flok biologis yang dapat mengadsorpsi dan menjebak mikroplastik sebelum mengendap sebagai lumpur. Korelasi BOD dengan mikroplastik disajikan pada **Gambar 4.11**.



**Gambar 4. 11** Korelasi BOD dengan Mikroplastik

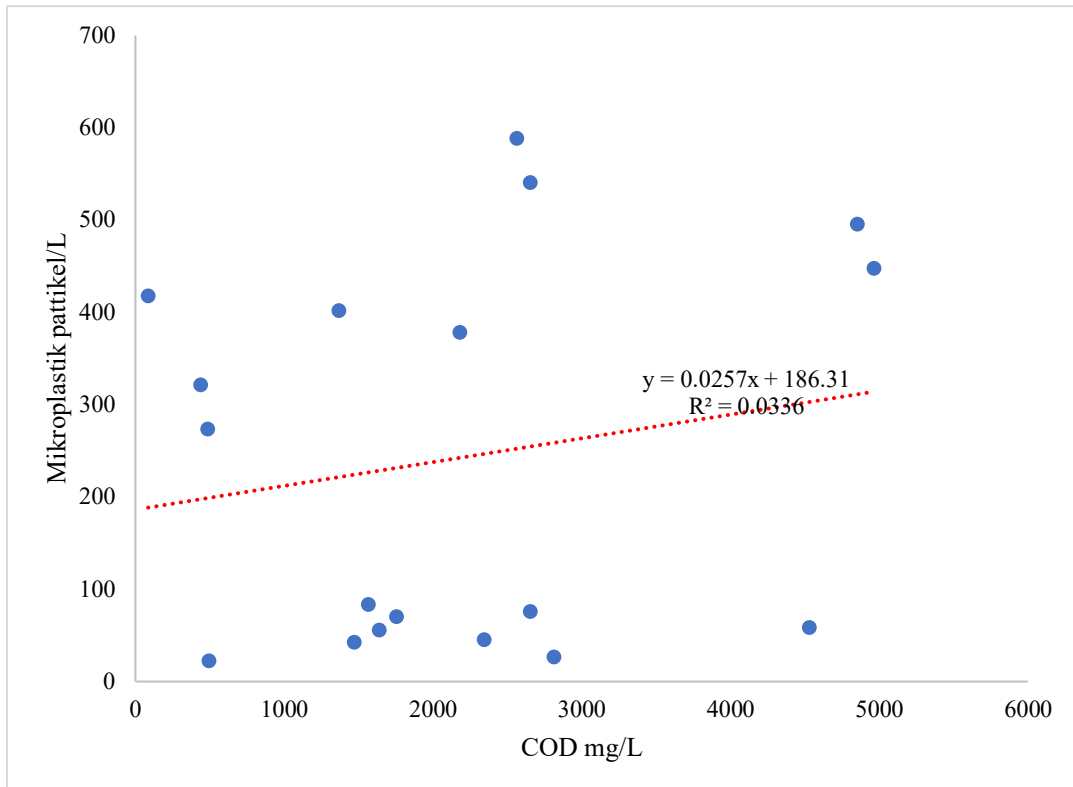
Berdasarkan **Gambar 4.11** Grafik di atas menunjukkan hubungan antara konsentrasi BOD dalam satuan mg/L dengan jumlah partikel mikroplastik per liter (Partikel/L) pada sampel yang dianalisis. Sumbu horizontal (x) merepresentasikan nilai BOD, sedangkan sumbu vertikal (y) menunjukkan jumlah partikel mikroplastik. Titik-titik biru pada grafik merepresentasikan data pengamatan, sedangkan garis biru yang menghubungkan titik-titik tersebut menunjukkan variasi data antar sampel. Garis merah putus-putus merupakan garis regresi linear yang menggambarkan tren umum hubungan antara BOD dan mikroplastik, dengan persamaan  $y = 0,0841x + 89,824$  dan koefisien determinasi  $R^2 = 0,2952$ .

Persamaan regresi ini menunjukkan bahwa terdapat kecenderungan jumlah partikel mikroplastik meningkat seiring meningkatnya konsentrasi BOD, meskipun hubungan ini tergolong lemah karena nilai  $R^2$  hanya sekitar 0,30, yang berarti hanya sekitar 30% variasi jumlah mikroplastik dapat dijelaskan oleh variasi BOD. Dengan kata lain, faktor-faktor lain selain BOD kemungkinan besar turut memengaruhi jumlah mikroplastik dalam sampel. Selain itu, sebaran titik data yang cukup menyebar menunjukkan adanya variasi yang cukup besar antar sampel, termasuk beberapa titik dengan jumlah mikroplastik tinggi meskipun BOD relatif rendah, menandakan adanya outlier atau kondisi spesifik di beberapa lokasi.

## **2. COD terhadap mikroplastik**

Korelasi antara COD dan mikroplastik pada grafik tersebut tergolong sangat lemah dan cenderung tidak signifikan. Hal ini ditunjukkan oleh nilai koefisien determinasi  $R^2 = 0,0336$ , yang berarti hanya sekitar 3,36% variasi jumlah mikroplastik dapat dijelaskan oleh perubahan nilai COD. Meskipun garis regresi memiliki kemiringan positif, peningkatan COD tidak diikuti oleh peningkatan jumlah mikroplastik secara konsisten. Sebaran titik data yang acak pada berbagai rentang COD menunjukkan bahwa konsentrasi mikroplastik tidak bergantung langsung pada beban organik terlarut yang diwakili oleh COD. Secara konseptual, hal ini dapat dijelaskan karena COD merepresentasikan kandungan bahan organik terlarut dan teroksidasi, sedangkan mikroplastik merupakan partikel padat yang lebih sering berasosiasi dengan padatan tersuspensi (TSS) daripada senyawa organik terlarut. Oleh karena itu, korelasi COD terhadap mikroplastik dalam air limbah relatif rendah

dibandingkan parameter fisik seperti TSS, sehingga COD tidak dapat digunakan sebagai indikator utama keberadaan mikroplastik.



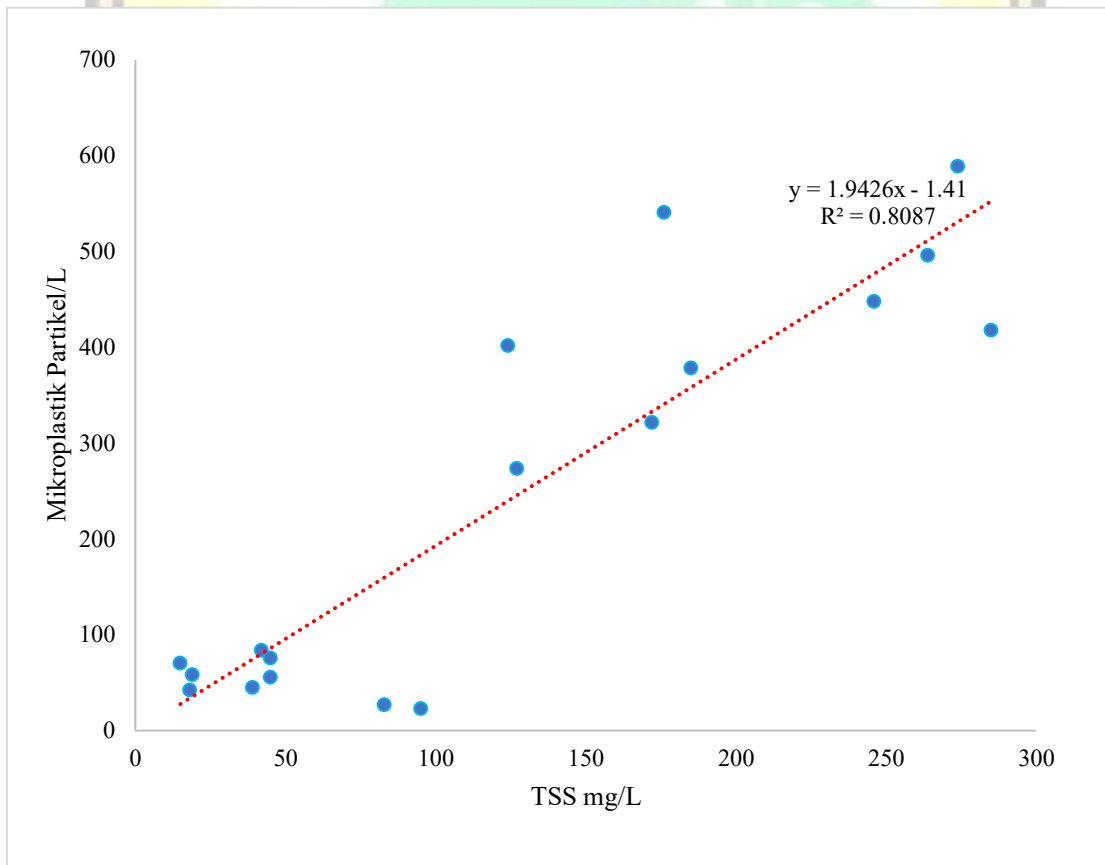
**Gambar 4.12** Korelasi COD terhadap mikroplastik

Berdasarkan **Gambar 4.12** di atas menunjukkan hubungan antara konsentrasi Chemical Oxygen Demand (COD) dengan jumlah partikel mikroplastik (partikel/L). Sumbu horizontal merepresentasikan nilai COD (mg/L), sedangkan sumbu vertikal menunjukkan jumlah mikroplastik. Berdasarkan sebaran titik data, terlihat bahwa jumlah mikroplastik tersebar luas pada berbagai nilai COD, baik pada COD rendah maupun tinggi, tanpa pola peningkatan yang konsisten. Hal ini diperkuat oleh persamaan regresi linear  $y = 0,0257x + 186,31$  dengan nilai koefisien determinasi  $R^2 = 0,0336$ , yang menunjukkan hubungan yang sangat lemah antara COD dan mikroplastik. Nilai  $R^2$  yang rendah mengindikasikan bahwa variasi konsentrasi COD hanya mampu menjelaskan sekitar 3,36% variasi jumlah mikroplastik, sehingga COD bukan merupakan parameter yang dominan dalam mempengaruhi keberadaan

mikroplastik. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa jumlah mikroplastik dalam air limbah tidak secara langsung berkorelasi dengan beban organik terlarut yang direpresentasikan oleh COD, melainkan kemungkinan lebih dipengaruhi oleh faktor lain seperti TSS, karakteristik sumber limbah, dan proses pengolahan di IPAL

### 3. TSS terhadap mikroplastik

TSS juga berperan sebagai media fisik tempat partikel mikroplastik menempel dan terdispersi dalam aliran air limbah. Proses sedimentasi dan filtrasi di bak ABR menyebabkan fraksi TSS mengendap bersama mikroplastik sehingga efisiensi penyisihan TSS yang tinggi berkontribusi langsung pada pengurangan mikroplastik. Korelasi TSS dengan mikroplastik disajikan pada **Gambar 4.13**.



**Gambar 4. 13** Korelasi TSS dengan mikroplastik

Berdasarkan **Gambar 4.12** Grafik di atas menunjukkan hubungan antara TSS dalam satuan mg/L dengan jumlah partikel mikroplastik per liter. Sumbu horizontal (X) merepresentasikan konsentrasi TSS, sedangkan sumbu vertikal (Y) menunjukkan jumlah mikroplastik. Dari grafik, terlihat adanya tren positif di mana

peningkatan TSS cenderung diikuti oleh peningkatan jumlah partikel mikroplastik, yang ditunjukkan oleh garis regresi linear berwarna merah dengan persamaan  $y = 1,9426x - 1,41$  dan nilai  $R^2 = 0,8087$ . Nilai  $R^2$  yang mendekati 0,81 mengindikasikan bahwa sekitar 81% variasi jumlah mikroplastik dapat dijelaskan oleh perubahan TSS, menunjukkan hubungan yang cukup kuat antara kedua parameter. Meskipun demikian, beberapa titik data menunjukkan penyebaran yang cukup lebar di sekitar garis regresi, menandakan adanya variasi lain yang mungkin mempengaruhi jumlah mikroplastik selain TSS. Secara keseluruhan, grafik ini mengilustrasikan bahwa partikel mikroplastik cenderung terikat atau terasosiasi dengan padatan tersuspensi di dalam air limbah.

Secara praktis, korelasi positif antara BOD, TSS, dan mikroplastik mengindikasikan bahwa keberhasilan pengendalian parameter konvensional dapat dijadikan indikator awal untuk menilai potensi pelepasan mikroplastik ke lingkungan. Namun demikian, masih ditemukannya mikroplastik pada efluen meskipun BOD dan TSS sudah turun menunjukkan bahwa sebagian partikel berukuran kecil tetap lolos dari proses pengolahan sehingga dibutuhkan unit *post-treatment* seperti *constructed wetland* untuk meningkatkan kinerja penyisihan

#### **1.6. Hasil Pemeriksaan Efisiensi Penyisihan Mikroplastik**

Efisiensi penyisihan mikroplastik menjadi parameter penting dalam menilai kinerja IPAL ABR di kota Jambi. Pengukuran dilakukan dengan membandingkan konsentrasi mikroplastik pada titik influen dan efluen ketiga unit IPAL. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa efisiensi penyisihan mikroplastik di ketiga IPAL ABR berkisar antara 60,93-90,40%, dengan variasi antar lokasi yang dipengaruhi oleh variasi beban awal mikroplastik, kondisi operasional, dan karakteristik lumpur. IPAL 3 menunjukkan efisiensi penyisihan tertinggi, mencapai hampir 90%, menandakan performa pengolahan yang lebih optimal dibandingkan IPAL lainnya. Perhitungan Kinerja dan hasil pemeriksaan mikroplastik pada influen dan efluen disajikan pada **Tabel 4.10.** dan perhitungan kinerja dan hasil pemeriksaan mikroplastik pada lumpur disajikan pada **Tabel 4.11.**

**Tabel 4.10.** Perhitungan Kinerja dan Hasil Pemeriksaan Mikroplastik di Influen dan Efluen pada IPAL ABR Kota Jambi

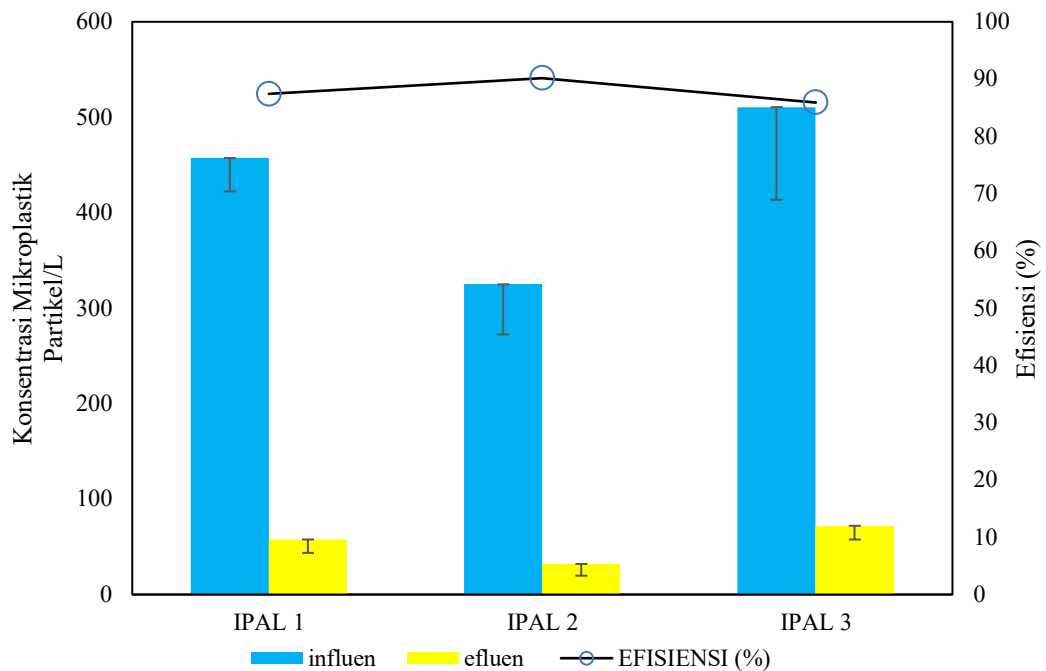
IPAL	Satuan	Influen	Efluen	Efisiensi penyisihan (%)	Rata-rata +SD	
					influen	Efluen
IPAL 1	Partikel/L	454	57,67	85,75	454 ± 39,34	57,56 ± 13,09
IPAL 2	Partikel/L	325	32	85,85	325 ± 52,56	32± 12,04
IPAL 3	Partikel/L	510,67	53	85,75	510,67 ± 97,12	53± 14,39

**Tabel 4.11.** Perhitungan Kinerja dan Hasil Pemeriksaan Mikroplastik di Lumpur pada IPAL ABR Kota Jambi

Lokasi IPAL	Satuan	Lumpur	Rata-rata +SD
IPAL 1	Partikel/Kg	4933	4933 ± 321,46
IPAL 2	Partikel/Kg	3800	3800 ± 400
IPAL 3	Partikel/Kg	6333	6333 ± 602,77

Meskipun terjadi penurunan signifikan konsentrasi mikroplastik pada efluen, masih terdapat partikel mikroplastik yang lolos melewati sistem pengolahan ini. Oleh karena itu, penggunaan unit pengolahan lanjutan (*post-treatment*) sangat direkomendasikan untuk meningkatkan efisiensi dan menurunkan keberadaan mikroplastik di efluen sehingga memenuhi standar lingkungan.

Efisiensi penyisihan ini sejalan dengan hasil studi sebelumnya, yang menunjukkan rentang efisiensi penyisihan mikroplastik pada IPAL antara 50% hingga 98% tergantung teknologi dan konfigurasi sistem yang digunakan (Lares dkk., 2018; Ali dkk., 2021). Untuk mendukung data di atas berikut disajikan **Gambar 4.14.** yang menunjukkan konsentrasi penyisihan mikroplastik di IPAL ABR Kota Jambi.



**Gambar 4.14.** Konsentrasi Kinerja Mikroplastik influen dan efluen di IPAL ABR

### 1.7. Penentuan Unit *Post-treatment* Menggunakan Metode SAW

Penentuan teknologi unit *post-treatment* yang paling sesuai untuk meningkatkan efisiensi penyisihan mikroplastik pada IPAL permukiman ABR di Kota Jambi dilakukan dengan menggunakan metode SAW. Metode SAW adalah teknik pengambilan keputusan yang mempertimbangkan beberapa kriteria dengan bobot kepentingan masing-masing untuk menentukan alternatif terbaik.

Langkah-langkah penerapan metode SAW pada penelitian ini meliputi:

1. Penentuan alternatif teknologi *post-treatment* yang akan dievaluasi, seperti filtrasi membran, koagulasi-flokulasi, filtrasi pasir (*sand filter*), dan *constructed wetland*.
2. Identifikasi kriteria evaluasi yang relevan, meliputi efektivitas penyisihan mikroplastik, efektivitas penyisihan pencemar lain, biaya konstruksi dan operasional, kebutuhan lahan, kemudahan operasional, dan dampak lingkungan.
3. Pemberian bobot pada masing-masing kriteria berdasarkan tingkat kepentingannya terhadap tujuan penelitian. Contoh bobot yang digunakan

adalah 30% untuk efektivitas penyisihan mikroplastik, 25% untuk biaya, dan proporsi lainnya untuk kriteria lain.

4. Penilaian skor untuk tiap alternatif terhadap setiap kriteria menggunakan skala 1 sampai 5, di mana 1 berarti sangat buruk dan 5 berarti sangat baik.
5. Normalisasi data dan penghitungan nilai total skor terbobot untuk menentukan peringkat alternatif *post-treatment*.

Penilaian hasil skoring dan peringkat skoring dari total masing-masing teknologi disajikan pada **Tabel 4.12**. Metode skoring dilakukan dengan memberikan nilai 1–5 untuk masing-masing kriteria, di mana: 1 = Sangat buruk, 2 = Buruk, 3 = Cukup, 4 = Baik, 5 = Sangat baik.

Hasil penerapan metode SAW menunjukkan bahwa teknologi *constructed wetland* mendapatkan nilai skor tertinggi dan dinilai paling sesuai sebagai unit *post-treatment* di lokasi penelitian. Keunggulan *constructed wetland* terletak pada kombinasi efektivitas penyisihan yang baik, biaya operasional rendah, kebutuhan lahan yang wajar, kemudahan pengoperasian, serta dampak lingkungan yang minimal.

**Tabel 4.12.** Hasil Skoring Alternatif Teknologi *Post-treatment*

Kriteria (C <sub>j</sub> )	Bobot (W <sub>j</sub> )	Atribut	Alternatif			
			Filtrasi Membran	Koagulasi -flokulasi	Filtrasi Pasir	Constructed Wetland
Efektivitas penyisihan mikroplastik	30 %	Benefit	2	3	2	4
Efektivitas Penyisihan Pencemar lainnya	15%	Benefit	3	3	3	5
Biaya konstruksi dan operasional	25%	Cost	3	4	3	5
Kebutuhan lahan	15%	Cost	2	3	4	5
Kemudahan Operasional	10%	Cost	3	4	2	5
Dampak lingkungan	5%	Benefit	2	2	4	5
<b>Total</b>	100%		0,73	0,67	0,71	0,75
<b>Peringkat</b>			<b>2</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>1</b>

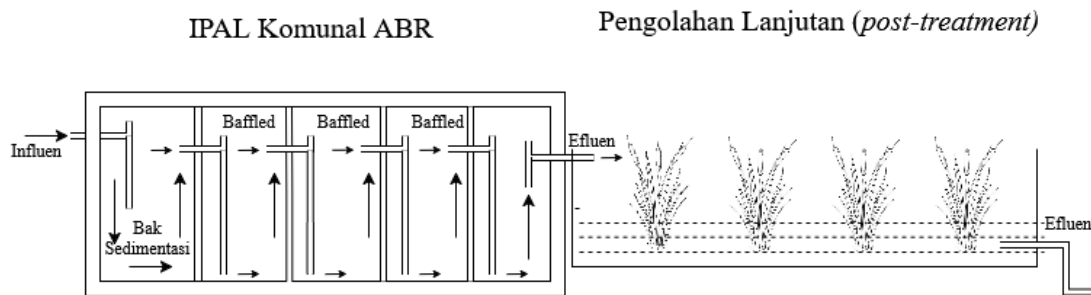
Keputusan ini memberikan dasar yang kuat bagi perancangan unit *post-treatment* yang efektif dan efisien untuk IPAL ABR di Kota Jambi guna meningkatkan kualitas efluen dan mengurangi pencemaran mikroplastik di lingkungan.

### 1.8. Desain Unit *Post-treatment* Terpilih

Berdasarkan hasil analisis kinerja unit utama IPAL ABR, diketahui bahwa konsentrasi mikroplastik pada efluen masih melebihi ambang batas yang menjadi acuan berdasarkan review beberapa studi internasional adalah sebesar 16,6 partikel/L (Carnevale dkk., 2024). Kondisi ini menunjukkan bahwa pengolahan lanjutan (*post-treatment*) sangat diperlukan untuk mencapai kualitas efluen yang lebih aman sebelum dilepaskan ke badan air penerima. Setelah mempertimbangkan berbagai opsi teknologi *post-treatment*, *constructed wetland* tipe *horizontal sub-surface flow* (HSSF CW) dipilih sebagai unit *post-treatment* yang paling sesuai untuk diterapkan di lokasi penelitian. Pemilihan ini didasarkan pada beberapa pertimbangan utama sebagai berikut:

- **Efektivitas Penyisihan Mikroplastik:**  
HSSF CW terbukti lebih efektif dalam menahan partikel mikroplastik dan padatan tersuspensi melalui proses filtrasi dan sedimentasi di media kerikil dan pasir yang terbenam. Penelitian terdahulu (Vymazal, 2011; Lares dkk., 2018) menunjukkan kemampuan HSSF CW dalam meningkatkan efisiensi removal mikroplastik secara signifikan dibandingkan tipe *constructed wetland* lain.
- **Keamanan Lingkungan:**  
Sistem HSSF CW mengurangi risiko kontak langsung antara air olahan dan lingkungan terbuka serta minim potensi bau tidak sedap, sehingga lebih aman dan adaptif pada lingkungan permukiman.
- **Kesesuaian Teknis dan Operasional:**  
HSSF CW mudah dioperasikan, tidak memerlukan pemeliharaan intensif, serta fleksibel terhadap keterbatasan lahan yang umum dijumpai pada wilayah domestik.
- **Dukungan Data Primer:**  
Hasil uji efisiensi pada rancangan HSSF CW menunjukkan peningkatan penyisihan mikroplastik dan parameter polutan lainnya, sehingga unit ini dinilai dapat membantu mencapai kualitas efluen yang memenuhi standar

Diagram alir rancangan desain unit *post-treatment* disajikan pada **Gambar 4.15**.



**Gambar 4.15.** Diagram Alir Rancangan Desain unit *post-treatment* Terpilih IPAL ABR Kota Jambi

Keterangan:

1. Desain unit *post-treatment* terpilih direncanakan sebanyak satu unit dengan kapasitas maksimum 80 SR dengan  $Q_{rata-rata}$  Adalah  $24 \text{ m}^3/\text{hari}$ . Direncanakan melebihi jumlah SR yang saat ini digunakan pada IPAL ABR di tiga Lokasi penelitian yaitu sebesar 53 SR.
2. Air limbah domestik rumah tangga mengalir melalui pipa menuju IPAL ABR masuk ke bak ekualisasi, lalu menuju ke bak sedimentasi, bak ABR dan keluar menuju efluen. Dari efluen ABR air limbah mengalir ke unit *post-treatment* terpilih untuk pengolahan lebih lanjut yaitu penyisihan mikroplastik dan parameter organik dan nutrien guna memenuhi baku mutu sehingga aman dibuang ke badan air atau lingkungan,
3. Berdasarkan debit air limbah ( $Q_{rata-rata}$ ) adalah  $24 \text{ m}^3/\text{hari}$ , maka didapatkan  $Q_{peak}$  sebesar  $28,8 \text{ m}^3/\text{hari}$ . Data debit puncak ini digunakan sebagai perhitungan unit *post-treatment*. Perhitungan debit puncak disajikan pada **Lampiran 11**.

Dengan semua pertimbangan tersebut, *constructed wetland* tipe HSSF ditetapkan sebagai pilihan utama dalam desain unit *post-treatment* untuk meningkatkan efisiensi penyisihan mikroplastik pada sistem pengolahan air limbah komunal di Kecamatan Alam Barajo, Kota Jambi.

### 1.8.1. Integrasi Unit *Post-treatment* dengan IPAL ABR

Unit *post-treatment* dirancang untuk integrasi secara optimal dengan sistem IPAL ABR eksisting pada fasilitas komunal. Integrasi ini dilakukan melalui beberapa aspek berikut:

#### 1. Koneksi Hidrolik

Kolam *wetland post-treatment* ditempatkan langsung setelah unit ABR, sehingga efluen hasil pengolahan utama dapat dialirkan secara gravitasi tanpa memerlukan pompa tambahan. Saluran keluar ABR (*effluent chamber*) dihubungkan dengan inlet *constructed wetland* menggunakan pipa PVC dan boks distribusi untuk memastikan aliran tetap merata, stabil, serta menghindari risiko *short-circuiting*.

#### 2. Kesesuaian Elevasi dan Lokasi

Perbedaan elevasi antara outlet ABR dan permukaan inlet *wetland* diperhitungkan agar air mengalir lancar dengan energi gravitasi. Penempatan area tanam dan media gravel di *wetland* mengikuti orientasi aliran linier (*horizontal subsurface flow*), menyesuaikan *layout* tapak IPAL eksisting dan kondisi lahan.

#### 3. Kemudahan Operasi & Maintenance

Terdapat akses jalan inspeksi di sepanjang sisi unit *wetland* untuk memudahkan operator melakukan pemantauan, pembersihan inlet, sampling efluen, dan perawatan media tanaman. Penambahan *buffer* pada area inlet dan outlet memungkinkan pengendalian distribusi aliran dan mencegah masuknya material besar atau lumpur sisa dari ABR.

#### 4. Keamanan dan Keselamatan

Sistem penutup dan pagar diterapkan di sekitar unit untuk melindungi area dari hewan liar, mencegah kecelakaan, serta menjaga estetika lingkungan permukiman. Selain itu, titik sampling diposisikan dekat outlet *wetland* agar memudahkan analisis kualitas efluen sesuai ketentuan

Dengan desain dan integrasi demikian, unit *post-treatment horizontal subsurface wetland* dapat beroperasi efektif sebagai tahap penyisihan lanjutan, memperbaiki kualitas efluen ABR sebelum padatan mikroplastik dan polutan lainnya dilepas ke lingkungan penerima.

### 1.8.2. Desain Constructed Wetland

Desain unit *post-treatment* berupa *constructed wetland* yang dipilih adalah tipe *Subsurface Horizontal Flow* (HSSF-CW), yang sudah terbukti efektif dalam menyisihkan mikroplastik dan parameter pencemar lainnya dari air limbah domestik. Desain CW mengacu pada kriteria desain yang disajikan pada **Tabel 2.6.** dan **Tabel 2.7.**

Desain ini mengacu pada parameter debit air limbah rata-rata sebesar 24 m<sup>3</sup>/hari dengan debit puncak ( $Q_{\text{peak}}$ ) 28,8 m<sup>3</sup>/hari. Dimensi *constructed wetland* sebagai *post-treatment* IPAL ABR di Kota Jambi sebagai berikut:

- Panjang (L) : 48 m
- Lebar (W) : 12 m
- Luas permukaan (A) : 576 m<sup>2</sup>
- Kedalaman media (d) : 0,6 m
- Porositas media (n) : 0,40 m
- *Hydraulic retention Time* (HRT) : 4,8 hari

Waktu tinggal hidrolis (HRT) dirancang sekitar 4,8 hari, memberikan waktu yang cukup bagi mikroorganisme dan tanaman seperti *Typha sp.*, untuk melakukan proses penyisihan dan degradasi polutan di dalam air limbah. Porositas media gravel ditetapkan sekitar 0,4, yang mendukung aliran air yang optimal dan kontak efektif antara air limbah dan mikroorganisme..

Dasar dan dinding kolam *constructed wetland* dilapisi dengan membran sintesis HDPE dengan ketebalan 2 mm untuk mencegah infiltrasi air limbah ke tanah sekitar. Slope dasar kolam diatur sekitar 0,5-1% guna menjamin aliran air yang merata dari inlet hingga outlet.

Material media terdiri dari gravel berukuran berbeda berturut-turut pada zona influen hingga efluen dimaksudkan untuk memfasilitasi filtrasi fisik dan mendukung pertumbuhan akar tanaman. Tanaman *Typha sp.* dipilih karena kemampuannya menyerap dan menguraikan bahan pencemar secara efektif.

Desain ini juga mempertimbangkan kemudahan operasional dan pemeliharaan, dengan akses yang memadai ke lokasi serta sistem drainase dan kontrol yang dirancang untuk menjaga kestabilan operasi *constructed wetland*. Perhitungan unit Rekapitulasi kriteria desain CW disajikan pada **Tabel 4.13.** Berdasarkan **Tabel**

4.15 menunjukkan bahwa hasil pemilihan atau perhitungan desain *constructed wetland* sebagai *post-treatment* IPAL ABR di Kota Jambi telah sesuai dengan kriteria desain yang terdapat pada buku panduan perhitungan bangunan pengolahan lumpur tinja untuk seluruh komponen.

Ketersediaan lahan merupakan salah satu aspek krusial dalam perancangan unit *post-treatment constructed wetland* di IPAL ABR Kota Jambi. Berdasarkan hasil audit lokasi dan denah eksisting (**Gambar 4.16, 4.1**), area yang tersedia di sekitar outlet ABR memiliki luas efektif 576 m<sup>2</sup> (dengan dimensi 48 m x 12 m) yang sudah mempertimbangkan akses kontrol, elevasi, dan kebutuhan operasional. Lokasi ini telah diverifikasi sesuai layout tapak komunikasi lokasi IPAL, tidak mengganggu fasilitas lainnya, dapat diakses dengan mudah untuk perawatan, inspeksi, dan integrasi hidrolis dari ABR menuju *wetland*.

### 1.8.3. Kebutuhan Tanaman Untuk Desain *Constructed Wetland*

Tanaman yang digunakan dalam desain *constructed wetland* tipe HSSF-CW ini adalah *Typha sp.*, yang dikenal memiliki kemampuan tinggi dalam menyerap dan menguraikan berbagai jenis polutan, termasuk mikroplastik dan parameter organik. Berdasarkan perhitungan kebutuhan tanaman untuk area seluas 576 m<sup>2</sup>, jumlah tanaman *Typha sp.* yang diperlukan adalah sekitar 2.208 rumpun. Tanaman ini dipilih karena mudah ditemukan, cepat tumbuh, dan adaptif terhadap kondisi lingkungan di Kota Jambi. Penanaman *Typha sp.* dilakukan dengan jarak tanam sesuai standar agar akar tanaman dapat menyebar optimal ke seluruh media gravel dan mendukung aktivitas mikroorganisme sebagai agen degradasi biologis dalam sistem *wetland*. Pemeliharaan tanaman meliputi penyiraman awal, pembersihan tanaman mati atau layu, serta pemupukan sesuai kebutuhan untuk menjaga kesehatan tanaman dan efektivitas sistem pengolahan. Pengadaan dan penanaman tanaman *Typha sp.* berhasil dilakukan dengan memperhitungkan kebutuhan biaya dan sumber daya yang tercakup dalam Rencana Anggaran Biaya (RAB) unit *constructed wetland*. Perhitungan kebutuhan tanaman *typha sp* untuk desain *constructed wetland* sebagai unit *post-treatment* untuk menyisihkan mikroplastik pada air limbah IPAL ABR di Kota Jambi disajikan pada **Lampiran 13**. Dengan pemilihan dan pengelolaan tanaman yang tepat, *constructed wetland* ini diharapkan

dapat berfungsi secara maksimal dalam menyisihkan mikroplastik dan parameter pencemar lainnya dari air limbah IPAL ABR.

#### **1.8.4. Bill of Quantity (BOQ)**

*Bill of Quantity* (BOQ) merupakan daftar perhitungan volume dan jenis pekerjaan beserta perkiraan biaya yang diperlukan untuk pembangunan unit *constructed wetland* sebagai *post-treatment* pada IPAL ABR. BOQ ini mencakup pekerjaan persiapan lahan, konstruksi, pemasangan media, instalasi pipa, serta penanaman tanaman *Typha sp.* Hasil volume pekerjaan disajikan pada **Tabel. 4.14.**

BOQ ini menjadi dasar dalam penyusunan Rencana Anggaran Biaya (RAB) dan memudahkan pengelolaan proyek konstruksi *constructed wetland* yang sesuai dengan desain teknis dan kebutuhan pengolahan air limbah di lapangan.

#### **1.8.5. Rencana Anggaran Biaya (RAB)**

Rencana Anggaran Biaya (RAB) merupakan perhitungan estimasi keseluruhan biaya yang dibutuhkan untuk pembangunan unit *constructed wetland* sebagai *post-treatment* pada IPAL ABR di Kota Jambi. Perhitungan RAB didasarkan pada jumlah volume pekerjaan yang telah diuraikan dalam BOQ dan menggunakan harga satuan pekerjaan sesuai dengan Analisis Harga Satuan Pekerjaan (AHSP) yang berlaku di wilayah Kota Jambi.

Estimasi biaya dalam RAB mencakup biaya pekerjaan persiapan lahan, penggalian tanah, pemasangan geomembrane HDPE, pengadaan dan penimbunan media gravel, instalasi pipa PVC untuk inlet, underdrain, dan outlet, serta pembelian dan penanaman tanaman *Typha sp.* Biaya pemeliharaan awal untuk tanaman juga dimasukkan dalam perhitungan.

**Tabel 4.13.** Rekapitulasi Perbandingan Hasil pemilihan Kriteria Desain dan Perhitungan Desain Terhadap Kriteria Desain *constructed wetland*

Komponen	Satuan	Kriteria Desain	Hasil pemilihan atau Perhitungan Desain	Keterangan	Sumber	
Dasar <i>wetland</i>	Cm/s	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lapisan tanah liat dengan permeabilitas <math>K= 10^{-6}</math></li> <li>Lapisan geomembran</li> </ul>	Lapisan tanah liat dengan permeabilitas $K= 10^{-6}$	sesuai	UN Habitat, 2008	
Media atau material filter	Mm	<ul style="list-style-type: none"> <li><i>Gravel</i> halus diameter (12-20)</li> <li><i>Gravel</i> kasar diameter (20-40)</li> </ul>	<i>Gravel</i> halus diameter (12-20) dan <i>Gravel</i> kasar diameter (20-40)	sesuai		
Tanaman yang dapat digunakan	-	Akar wangi; <i>Cat Tail</i> ; <i>Papyrus</i> ; <i>Typha</i> ; <i>Phragmites Communis</i> ; <i>Khana Sp</i> ; <i>Echinodorus Palaefolius</i> <i>Nymphaea</i> ; <i>Water Hyacinth</i> ; Atau Tumbuhan <i>Familia Typhaceae</i>	<i>Typha</i>	sesuai		
Kedalaman air limbah <i>constructed wetland</i>	Cm	<90	60 cm	sesuai		
<i>freeboard</i>	Cm	30	30 cm	sesuai		
<i>Slide slope</i>		3:1 – 10:1	10 : 1	sesuai		
Zona <i>gravel</i> kasar influen dan efluen	m	Minimal 0,75	1	sesuai		
Lebar tanah liat	m	0,2	0,2			(Harahap dkk., 2023; UN HABITAT, 2008)
Waktu retensi hidrolis (HRT) untuk menyisihkan polutan terlarut	Hari	5-14	4,8	sesuai		(Bendoricchio dkk., 2000; Crites, 1994)
Waktu retensi hidrolis (HRT) untuk menyisihkan polutan tersuspensi	hari	0,5 – 3	0,42	sesuai		
Laju beban hidrolis (HLR)	m/hari	0,01 – 0,05	0,049	sesuai		
Rasio panjar : lebar	-	4 : 1 – 6 : 1	4 : 1 dengan panjang 48 m lebar 12 m	sesuai		
Porositas media <i>gravel</i> halus	-	0,38	0,38	sesuai	(Metcalf & Eddy, 2003)	
Porositas media <i>gravel</i> kasar	-	0,4	0,4	sesuai		
Debit rata-rata	m <sup>3</sup> /hari	-	24		Penelitian saat ini	
Debit puncak ( $Q_{peak}$ )	m <sup>3</sup> /hari	-	28,8		Penelitian saat ini	

**Tabel 4.14.** Perhitungan Rencana Anggaran Biaya (RAB) unit *Constructed Wetland*

No.	Uraian Pekerjaan	Satuan	Volume	Analisa	Harga Satuan	Jumlah Harga
1	Biaya Persiapan Pekerjaan					
a	pembersihan lahan	m <sup>2</sup>	576	AHSP	Rp 5.136,00	Rp 2.958.336,00
b	pengukuran dan pemasangan patok lahan	m <sup>2</sup>	120	ASHP	Rp 164.278,00	Rp 19.713.360,00
c	penggalian tanah	m <sup>3</sup>	527,04	AHSP	Rp 58.000,00	Rp 30.568.320,00
d	pembelian tanah liat	m <sup>3</sup>	8,64	AHSP	Rp 103.488,00	Rp 894.136,32
e	pemadatan tanah liat	m <sup>3</sup>	8,64	AHSP	Rp 45.600,00	Rp 393.984,00
	Jumlah					<b>Rp 54.528.136,32</b>
2	Pekerjaan Material Filter Constructed Wetland					
a	pembelian gravel kasar	m <sup>3</sup>	57,60	AHSP	Rp 350.000,00	Rp 20.160.000,00
b	pembelian gravel halus	m <sup>3</sup>	345,60	AHSP	Rp 350.000,00	Rp 120.960.000,00
c	penimbunan gravel kasar	m <sup>3</sup>	57,60	AHSP	Rp 45.600,00	Rp 2.626.560,00
d	penimbunan gravel halus	m <sup>3</sup>	345,60	AHSP	Rp 45.600,00	Rp 15.759.360,00
	Jumlah					<b>Rp 159.505.920,00</b>
3	Pekerjaan Pipa					
a	pipa PVC Ø 5 inch	m	3	AHSP	Rp 98.750,00	Rp 296.250,00
b	pemasangan pipa PVC Ø 5 inch	m	3	AHSP	Rp 122.000,00	Rp 366.000,00
	Jumlah					<b>Rp 662.250,00</b>
4	Pekerjaan Tanaman					
a	Pembelian tanaman typha sp	rumpun	2.208	Online store	Rp 7.500,00	Rp 16.560.000,00
b	Penanaman dan pemeliharaan typha sp	rumpun	2.208	AHSP	Rp 2.500,00	Rp 5.520.000,00
	Jumlah					<b>Rp 22.080.000,00</b>
	Sub-Total					<b>Rp 236.776.306,32</b>
	Contingency 10%					<b>Rp 23.677.630,63</b>
	GRAND TOTAL					<b>Rp 260.453.936,95</b>

Catatan: Harga satuan mengacu pada harga pasar lokal terkini di wilayah Kota Jambi dan dapat mengalami perubahan tergantung kondisi pasar dan pelaksanaan lapangan.

Berdasarkan perhitungan, total anggaran biaya yang diperlukan untuk pembangunan unit *constructed wetland* ini diperkirakan sebesar Rp 260.453.936.95. Nilai ini mencakup biaya material, tenaga kerja, dan peralatan yang dibutuhkan selama proses konstruksi hingga tahap siap operasi.

Biaya yang direncanakan ini dapat berubah sesuai dengan kondisi lapangan, fluktuasi harga bahan material dan jasa, serta kebijakan daerah. Oleh karena itu,

RAB disusun sebagai acuan awal dalam proses perencanaan dan penganggaran proyek pengolahan air limbah.

Dengan alokasi biaya yang tepat, diharapkan pembangunan *constructed wetland* dapat berjalan lancar dan menghasilkan unit pengolahan yang efektif serta berkelanjutan. Uraian RAB *constructed wetland* sebagai *post-treatment* IPAL ABR di Kota Jambi disajikan pada **Tabel 4.14**.

### **3.9. Estimasi Efisiensi Penyisihan Mikroplastik pada Desain *Constructed Wetland* sebagai Unit *Post-Treatment* IPAL ABR di Kota Jambi Berdasarkan studi Literatur**

Estimasi efisiensi penyisihan mikroplastik pada *desain constructed wetland* sebagai unit *post-treatment* IPAL ABR di Kota Jambi dilakukan dengan mengacu pada perubahan konsentrasi mikroplastik antara influen dan efluen *constructed wetland*. Pendekatan ini sejalan dengan berbagai penelitian *constructed wetland* dan instalasi pengolahan air limbah yang mendefinisikan efisiensi penyisihan mikroplastik sebagai persentase penurunan konsentrasi atau kelimpahan mikroplastik dari air masuk ke air keluar unit pengolahan.

#### **3.9.1. Dasar teoritis dan rumus efisiensi berbasis konsentrasi**

Secara umum, efisiensi penyisihan mikroplastik  $\eta_{MP}$  pada suatu unit pengolahan air limbah dapat dinyatakan sebagai:

$$\eta_{MP} = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100\%$$

di mana  $C_{in}$  adalah konsentrasi mikroplastik pada influen unit (dalam hal ini efluen ABR yang masuk ke *constructed wetland*) dan  $C_{out}$  adalah konsentrasi mikroplastik pada efluen *constructed wetland*. Rumus ini digunakan secara luas dalam studi yang mengevaluasi keberadaan dan penyisihan mikroplastik di instalasi pengolahan air limbah dan *constructed wetland*, termasuk pada sistem Cihu *sewage treatment plant* yang dilengkapi *constructed wetland* multi-tahap serta pada berbagai sistem *constructed wetland* skala penuh di Eropa.

Dalam konteks penelitian ini,  $C_{in}$  diperoleh dari hasil pengukuran atau estimasi konsentrasi mikroplastik di efluen ABR IPAL 1, IPAL 2, dan IPAL 3. Nilai  $C_{out}$  selanjutnya diestimasi berdasarkan efisiensi penyisihan yang diambil dari studi literatur *constructed wetland* yang memiliki karakteristik sebanding dengan desain *constructed wetland* sebagai unit post-treatment di Kota Jambi.

### **3.9.2. Ringkasan efisiensi penyisihan mikroplastik *constructed wetland* dari studi literatur**

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa *constructed wetland*, terutama dengan konfigurasi aliran bawah permukaan (horizontal maupun vertikal) yang digunakan sebagai pengolahan tersier, memiliki kemampuan tinggi dalam menyisihkan mikroplastik. Studi pada sistem *Cihu sewage treatment plant* dan *constructed wetland*-nya melaporkan bahwa kelimpahan mikroplastik di air limbah menurun secara signifikan di sepanjang rangkaian pengolahan, dengan konsentrasi di efluen akhir mencapai sekitar 2,2 partikel/L dan efisiensi penyisihan total oleh sistem *constructed wetland* sekitar 94,7%.

Penelitian lain yang mengevaluasi dua sistem *constructed wetland* berbeda untuk pengolahan air limbah domestik (*vertical flow* dan *horizontal subsurface flow*) melaporkan konsentrasi mikroplastik di influen pada orde beberapa partikel per liter dan konsentrasi di efluen CW turun menjadi sekitar 0,3–0,8 partikel/L, dengan efisiensi penyisihan mikroplastik yang dihitung dari perbedaan konsentrasi tersebut mencapai sekitar 89–97%.

Selain itu, review mengenai *removal micro/nanoplastics* pada *constructed wetland* menyimpulkan bahwa sebagian besar *constructed wetland* skala penuh yang digunakan sebagai *post-treatment* mampu mencapai efisiensi penyisihan mikroplastik pada kisaran 87–97%, tergantung konfigurasi aliran, jenis media, dan waktu tinggal hidrolis, dengan efisiensi selalu dihitung berdasarkan perubahan konsentrasi atau massa mikroplastik antara influen dan efluen.

Berdasarkan rangkuman hasil studi tersebut, dapat disimpulkan bahwa nilai efisiensi penyisihan mikroplastik yang realistis untuk *constructed wetland* sebagai

unit *post-treatment* berada pada kisaran tinggi, umumnya di atas 80% dan sering mendekati atau melebihi 90% pada sistem dengan desain dan operasi yang optimal.

### 3.9.3. Penetapan efisiensi desain *constructed wetland* IPAL ABR di Kota Jambi

Desain *constructed wetland* sebagai unit *post-treatment* IPAL ABR di Kota Jambi memiliki luas permukaan 576 m<sup>2</sup> dan melayani beban air limbah relatif kecil (53 sambungan rumah per IPAL), sehingga beban hidrolis per satuan luas lebih rendah dibandingkan beberapa studi literatur. Dalam kondisi demikian, berdasarkan perbandingan dengan studi-studi *constructed wetland* skala penuh yang dikaji, efisiensi penyisihan mikroplastik untuk desain *constructed wetland* ini secara konservatif dapat diambil dalam kisaran 90–95%.

Dalam penelitian ini, efisiensi desain penyisihan mikroplastik oleh *constructed wetland* ( $\eta_{MP,desain}$ ) sebagai unit *post-treatment* IPAL ABR 1, IPAL ABR 2, dan IPAL ABR 3 ditetapkan sebesar 95%. Nilai ini dipilih karena masih berada dalam rentang efisiensi yang dilaporkan pada berbagai studi *constructed wetland* sebagai pengolahan tersier dan secara realistis menggambarkan kemampuan *constructed wetland* untuk menurunkan konsentrasi mikroplastik di efluen IPAL hingga mendekati nol, tanpa mengasumsikan efisiensi ideal 100%.

### 3.9.4. Estimasi konsentrasi mikroplastik efluen *constructed wetland*

Dengan efisiensi desain  $\eta_{MP,desain}$  sebesar 95%, konsentrasi mikroplastik di efluen *constructed wetland* untuk masing-masing IPAL dapat diestimasi dari konsentrasi mikroplastik di efluen ABR menggunakan persamaan:

$$C_{out} = C_{in} \times (1 - 0,95) = C_{in} \times 0,05$$

Sebagai ilustrasi, apabila konsentrasi mikroplastik di efluen ABR untuk IPAL 1, IPAL 2, dan IPAL 3 masing-masing adalah  $C_{in,1}$ ,  $C_{in,2}$ , dan  $C_{in,3}$  (dalam partikel/L), maka estimasi konsentrasi mikroplastik di efluen *constructed wetland* ( $C_{out,1}$ ,  $C_{out,2}$ ,  $C_{out,3}$ ) adalah:

$$C_{out,1} = 0,05 \times C_{in,1}$$

$$C_{out,2} = 0,05 \times C_{in,2}$$

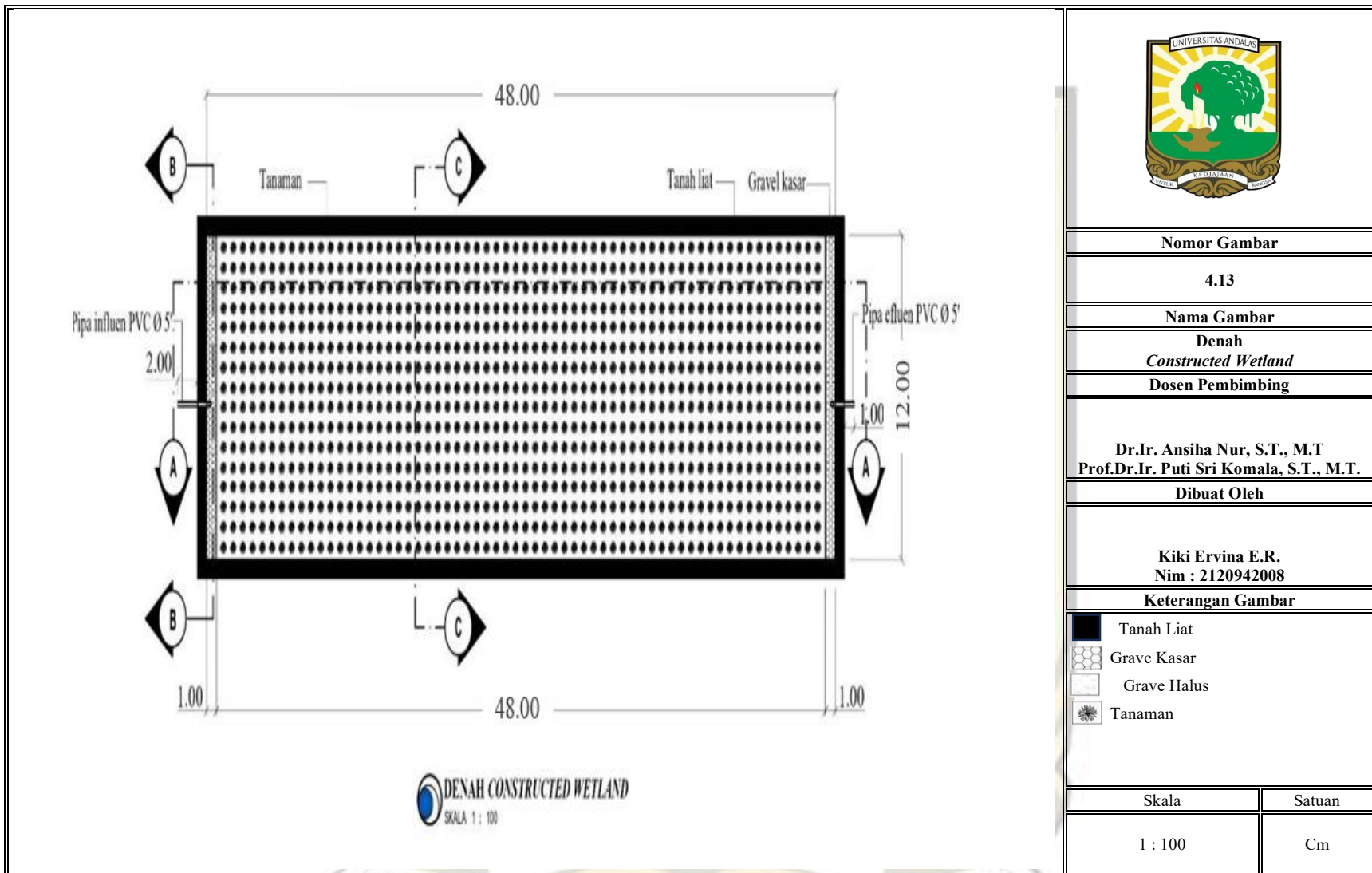
$$C_{out,3} = 0,05 \times C_{in,3}$$

Dengan demikian, *constructed wetland* sebagai unit *post-treatment* IPAL ABR di Kota Jambi diperkirakan mampu mengurangi konsentrasi mikroplastik di efluen ABR sebesar 95%, sebagaimana ditunjukkan oleh berbagai *constructed wetland* skala penuh yang dilaporkan dalam literatur. Estimasi Kinerja Penyisihan Mikroplastik Berdasarkan Literatur Pada Desain *Constructed Wetland* IPAL ABR di Kota Jambi di sajikan pada **Tabel 4.15**.

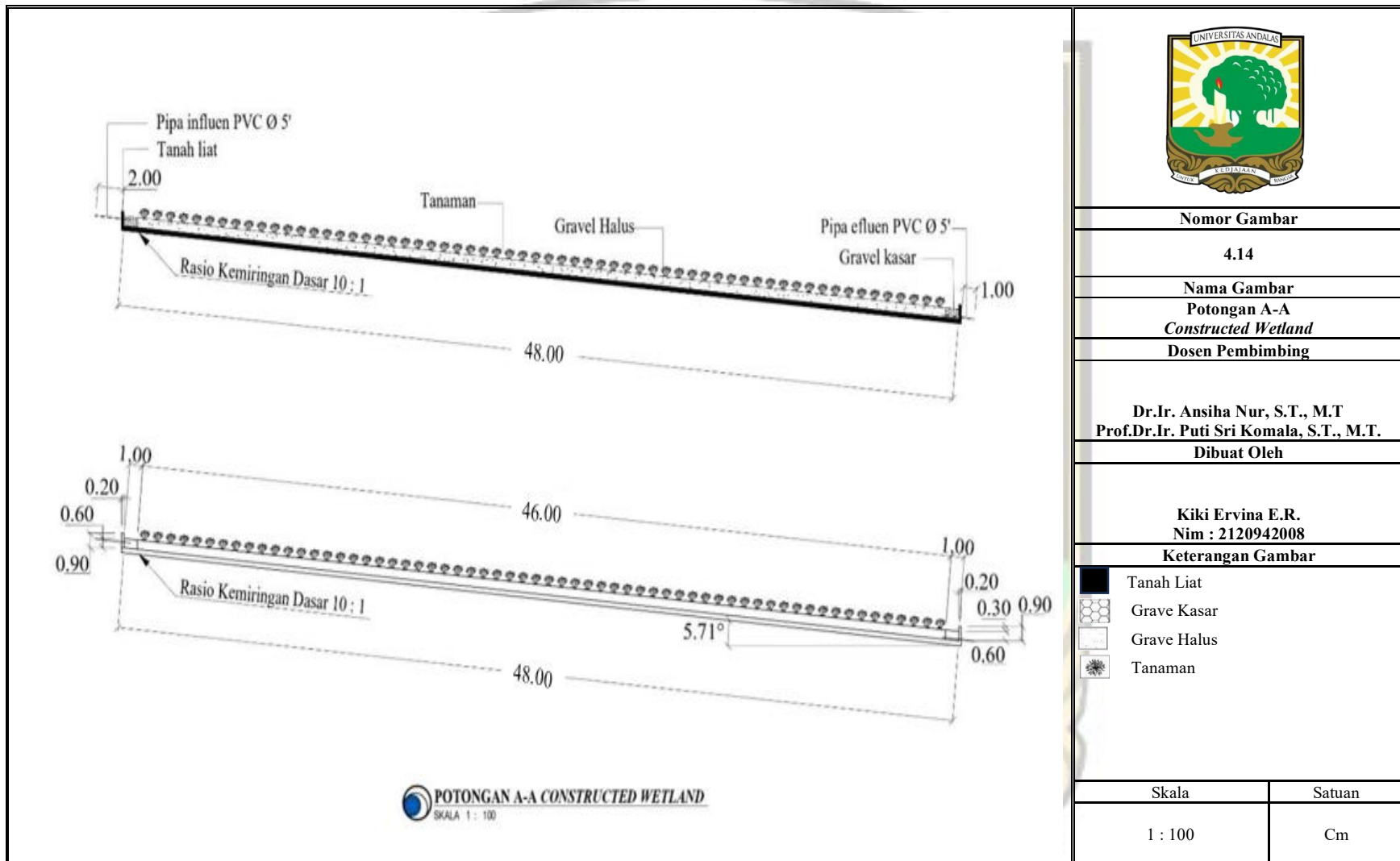
**Tabel 4.15.** Estimasi Kinerja Penyisihan Mikroplastik Berdasarkan Literatur Pada *Desain Constructed Wetland* IPAL ABR di Kota Jambi

IPAL	Konsentrasi Mikroplastik Efluen ABR $C_{in}$	Konsentrasi mikroplastik efluen CW $C_{out}$ (Asumsi 98%)	Efisiensi penyisihan mikroplastik $\eta_{MP}$ (%)
IPAL 1	57,56	1,15	98%
IPAL 2	31,86	0,64	98%
IPAL 3	71,98	1,44	98%

Dengan menggunakan efisiensi desain *constructed wetland* sebesar 98%, yang diambil berdasarkan kisaran efisiensi *constructed wetland* tersier pada berbagai studi ( $\approx 88-100\%$ ), konsentrasi mikroplastik di efluen *constructed wetland* IPAL 1, 2, dan 3 diperkirakan masing-masing turun menjadi 1,15; 0,64; dan 1,44 partikel/L dari konsentrasi awal 57,56; 31,86; dan 71,98 partikel/L di efluen ABR. Hal ini menunjukkan bahwa *constructed wetland* sebagai unit *post-treatment* berpotensi menyisihkan sekitar 98% mikroplastik pada masing-masing IPAL.



**Gambar 4.16. Denah Constructed Wetland**



**Nomor Gambar**

**4.14**

**Nama Gambar**

**Potongan A-A  
Constructed Wetland**

**Dosen Pembimbing**

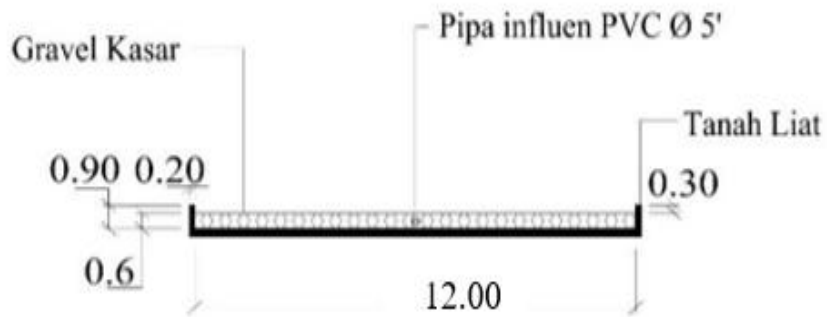
**Dr.Ir. Ansiha Nur, S.T., M.T  
Prof.Dr.Ir. Puti Sri Komala, S.T., M.T.**

**Dibuat Oleh**

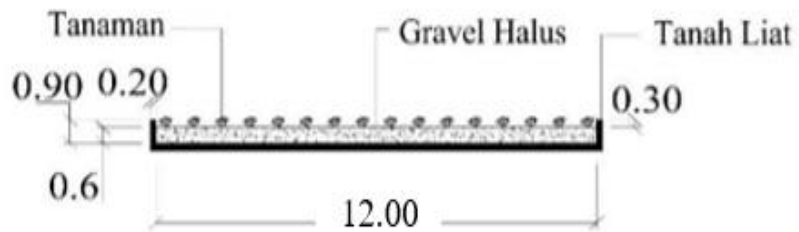
**Kiki Ervina E.R.  
Nim : 2120942008**

**Keterangan Gambar**

-  Tanah Liat
-  Grave Kasar
-  Grave Halus
-  Tanaman



**POTONGAN B-B CONSTRUCTED WETLAND**  
SKALA 1 : 100



**POTONGAN C-C CONSTRUCTED WETLAND**  
SKALA 1 : 100



Nomor Gambar

4.15

Nama Gambar

Potongan B-B *Constructed Wetland*  
Potongan C-C *Constructed Wetland*

Dosen Pembimbing

Dr.Ir. Ansiha Nur, S.T., M.T  
Prof.Dr.Ir. Puti Sri Komala, S.T., M.T.

Dibuat Oleh

Kiki Ervina E.R.  
Nim : 2120942008

Keterangan Gambar

-  Tanah Liat
-  Gravel Kasar
-  Gravel Halus
-  Tanaman

Skala

Satuan

1 : 100

Cm

**Gambar 4.18.** Potongan B-B dan potongan C- C *Constructed Wetland*



**Nomor Gambar**

**4.16**

**Nama Gambar**

**Tampak Atas ABR  
Denah ABR**





**Dosen Pembimbing**

**Dr.Ir. Ansiha Nur, S.T., M.T  
Prof.Dr.Ir. Puti Sri Komala, S.T., M.T.**

**Dibuat Oleh**

**Kiki Ervina E.R.  
Nim : 2120942008**

**Keterangan Gambar**

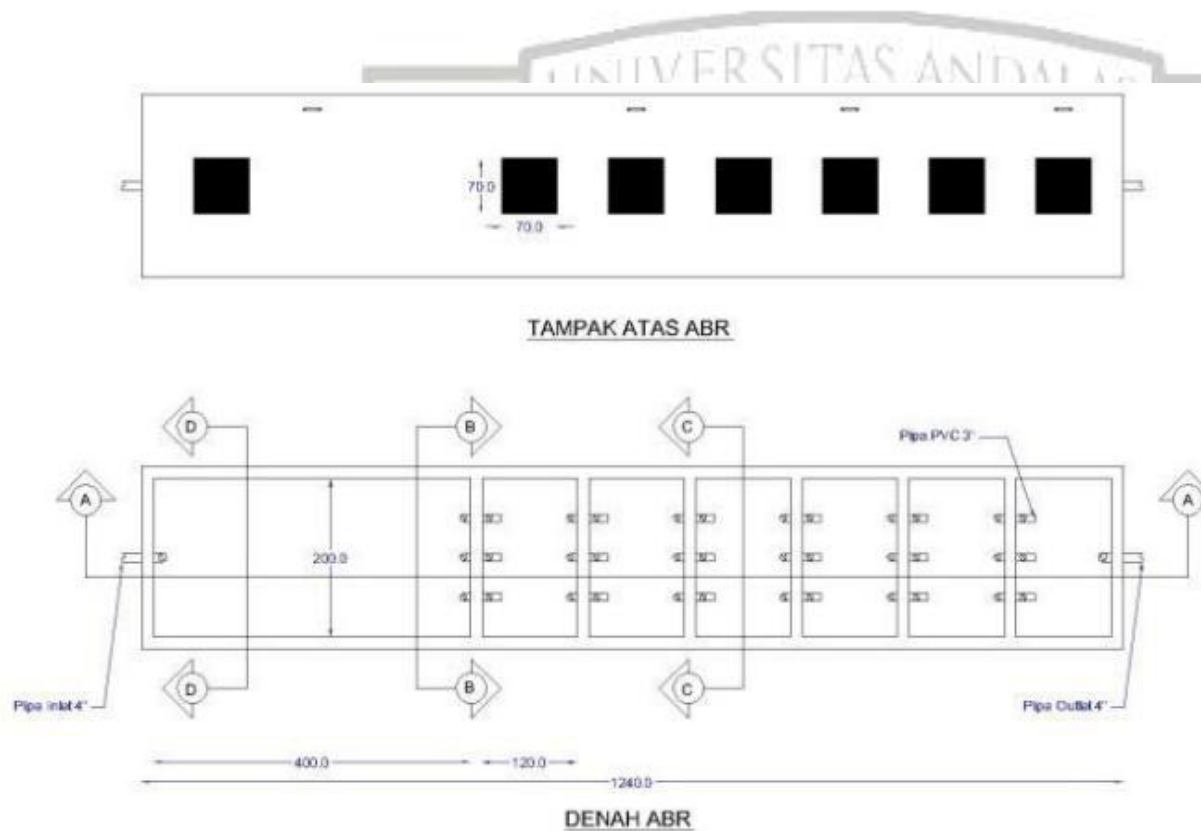
-  Tanah Liat
-  Grave Kasar
-  Grave Halus
-  Tanaman

**Skala**

**1: 30**

**Satuan**

**Cm**



**Gambar 4.19. Potongan B-B, C-C, dan D-D ABR**